

Giuseppe Zicari

Agriculture chimique et pollinisateurs : signes d'une Planète en danger

Biosurveillance par les abeilles



**Indicateurs environnementaux de la sécurité alimentaire
et de la santé : climat, biodiversité, énergie, fertilité,
pesticides et biotechnologies.**

En couverture

Les abeilles, ces créatures extraordinaires qui peuplent la planète depuis plus de 100 millions d'années, sont le fil conducteur de divers défis écologiques tels que la réduction de la biodiversité, le changement climatique, la dégradation des sols et la transition énergétique. Lorsque l'espèce la plus présomptueuse de la planète interfère avec le cours de la nature, elle cause de graves dommages, altérant la possibilité de survie des non-humains, comme les pollinisateurs, sans se rendre compte qu'il s'agit en fait d'un écocide autodestructeur. Paradoxalement, l'agriculture, qui est l'une des activités les plus étroitement dépendantes d'une biosphère saine, est l'une des principales causes de changements irréversibles et donc non durables tels que le réchauffement de la planète et l'extinction des pollinisateurs dont elle tire ses bénéfices et sa richesse. L'utilisation massive de combustibles fossiles, la distribution de poisons tels que les pesticides (ils sont persistants, toxiques et bioaccumulables), la perte de fertilité, en monocultures de plantes sélectionnées pour répondre aux besoins économiques (par exemple, les organismes génétiquement modifiés), sont quelques-unes des principales causes d'un système de production alimentaire écologiquement non durable. Le temps presse, nous ne pouvons pas nous permettre de gaspiller des ressources économiques telles que celles consacrées à la production d'agrocarburants (maïs cultivé pour le méthane, le biogaz) et de plantes génétiquement modifiées (par exemple, celles rendues résistantes aux herbicides) ; nous devons faire un pas en arrière dans notre façon de gérer les ressources naturelles. Une espèce ne peut prospérer que si toutes les autres sont en bonne santé, nous devons adhérer à ce principe. Ce livre tente de raconter une vision différente du monde que nous construisons, une histoire pleine d'anecdotes et de dangers sous-estimés.

Giuseppe Zicari est expert agronome et biologiste (Université de Padoue), spécialisé en génétique appliquée (Université de Bologne) et a obtenu un doctorat en sciences de l'environnement, eaux intérieures et agro-écosystèmes (Université du Piémont Oriental). Il a travaillé en tant que biologiste, collaborant avec des entreprises du secteur alimentaire, plusieurs universités et le Service Sanitaire National. Il enseigne Sciences de la Vie et de la Terre et Chimie (*à temps partiel*) dans des lycées ; il a remporté le Prix National de la Publication Scientifique Universitaire (remis par la « Associazione Italiana del Libro ») avec le livre *ENERGIE RINNOVABILI DA BIOMASSE : RISCHI E OPPORTUNITA. COLTIVAZIONI, ALLEVAMENTI, COMPOST, BIOGAS E AGRO-CARBURANTI : ANALISI DEGLI IMPATTI AMBIENTALI, DELLE RICADUTE SULLA SALUTE E DELLA SOSTENIBILITÀ (2016 - Énergies renouvelables provenant des biomasses : risques et opportunités. Cultures, élevages, compost, biogaz et agrocarburants : analyse des impacts sur l'environnement, des effets sur la santé et de la durabilité)*. Il a publié plus de 90 ouvrages, dont les suivants : *L'IGIENE DEGLI ALIMENTI (2001 - L'hygiène des aliments)* ; *GESTIONE DELLA SICUREZZA ALIMENTARE (2003 - Gestion de la sécurité alimentaire)* ; *LA TUTELA AMBIENTALE : ADEMPIMENTI OBBLIGATORI E STRATEGIE VOLONTARIE (2008 - La protection de l'environnement : obligations et stratégies volontaires)* ; *OLTRE I LIMITI ECOLOGICI : ambiente, salute e cultura non rinnovabili (2015 - Au-delà des limites écologiques : environnement, santé et culture non renouvelables)* ; la plupart des publications peuvent être téléchargées gratuitement sur le site : <https://sites.google.com/site/zicari73/>.

Giuseppe Zicari

**Agriculture chimique et
pollinisateurs : signes d'une
Planète en danger**

Biosurveillance par les abeilles

*Indicateurs environnementaux de la sécurité
alimentaire et de la santé : climat, biodiversité, énergie,
fertilité, pesticides et biotechnologies.*

Comment citer ce livre : Giuseppe Zicari. **Agriculture chimique et pollinisateurs : signes d'une Planète en danger**. Biosurveillance par les abeilles. Indicateurs environnementaux de la sécurité alimentaire et de la santé : climat, biodiversité, énergie, fertilité, pesticides et biotechnologies. <https://sites.google.com/site/zicari73/> (2023).

Livre original (en italien) terminé en octobre 2021 et publié en janvier 2022 (© Copyright 2022) ; titre original : **Agricoltura chimica e impollinatori : segnali di un Pianeta in pericolo. Il biomonitoraggio con le api. Indicatori ambientali della sicurezza alimentare e della salute : clima, biodiversità, energia, fertilità, pesticidi e ingegneria genetica**. Youcanprint (2022).

La traduction en français a été réalisée par Anastasia Gola.

Cette publication est le résultat de plus de trois ans de rédaction et de nombreuses années d'étude et d'activité sur le terrain, et n'a bénéficié d'aucun type d'aide financière ou de parrainage indirect. L'indépendance est la valeur qui a permis de réaliser cette publication sans contraintes ni conditionnements d'aucune sorte, mais avec des sacrifices considérables. Dans l'espoir qu'une meilleure connaissance des thèmes abordés puisse favoriser la prise de conscience des changements nécessaires, j'ai décidé de mettre gratuitement à disposition la version numérique de cet ouvrage afin d'en faciliter la diffusion la plus large possible (le format PDF peut être téléchargé gratuitement, en italien, en anglais et en français, à partir du site : <https://sites.google.com/site/zicari73/>). La version papier du livre en italien, en anglais et en français peuvent être achetées sur le site <https://www.youcanprint.it/store>

L'auteur de l'œuvre (Giuseppe Zicari) reste le seul et unique propriétaire de l'œuvre, ainsi que le seul détenteur des droits d'auteur correspondants en tant qu'unique créateur de l'œuvre, expression particulière de son propre travail intellectuel. L'œuvre est publiée sous la licence Creative Commons 4.0 (Attribution - Noncommercial - NoDerivatives 4.0 Unported ; CC BY-NC-ND 4.0), par conséquent la copie, la distribution, la visualisation et l'utilisation sont autorisées à condition que l'œuvre ne soit pas modifiée, qu'elle ne soit pas utilisée à des fins commerciales et que l'auteur soit toujours indiqué. Avec cette licence, l'auteur autorise donc la copie et la distribution de son œuvre, mais pas sa modification. L'Auteur accorde à tous le droit d'accès gratuit à la version numérique de l'œuvre, irrévocable et universel, et l'autorisation de la reproduire et de la distribuer pour toute fin responsable s'il en conserve la paternité intellectuelle.

Couverture : photo de Marco Basso.

*À mes parents et à Anastasia qui m'ont aidé et
soutenu surtout dans les moments les plus difficiles ;
à mes neveux, dans l'espoir d'un avenir meilleur
que le bon sens permet de prévoir.*

INDEX

INTRODUCTION.....	1
Avant-propos.....	1
LE FIL CONDUCTEUR : LES POLLINISATEURS ET LA SÉCURITÉ ALIMENTAIRE	3
CONSIDÉRATIONS PERSONNELLES	4
PREMIÈRE PARTIE	
ABEILLES : BIOINDICATEURS D'UN MONDE EN DANGER.....	6
ABEILLES ET APICULTURE	7
LE SECTEUR APICOLE DANS LE MONDE ET EN ITALIE	7
LES ABEILLES, GARDIENNES DE NOTRE AVENIR	9
L'ÉCART DÉSARMANT GÉNÈRE UN SYNDROME D'AVEUGLEMENT CONSCIENT FACE À UNE CATASTROPHE PLANIFIÉE	10
LA BIOLOGIE DES ABEILLES (<i>Apis mellifera</i>) : un exemple de société féminine de travailleuses infatigables, organisées et altruistes.....	13
LE SERVICE DE POLLINISATION.....	19
LE MIEL	20
LE POTENTIEL MELLIFÈRE.....	23
LES PRINCIPALES CULTURES POLLINISÉES PAR LES ABEILLES	24
CERTAINS TYPES DE FRAUDE CONCERNANT LE MIEL	26
SYMBIOSE ENTRE LES HYMÉNOPTÈRES ET LES FIGUIERS.....	27
LE MIEL DE MIELLATS.....	27
LA CIRE D'ABEILLE DANS LES SECTEURS ALIMENTAIRE ET PHARMACEUTIQUE	28
LA PROPOLIS.....	30
LE COMPORTEMENT DES ABEILLES	30
LES BOURDONS	34
HÉRÉDITÉ ET SOCIALITÉ.....	36
LES FOURMIS : DIVISION DU TRAVAIL ET COOPÉRATION	37
ABEILLES ET APPLICATIONS TECHNOLOGIQUES	43
ABEILLES SUIVIES PAR DES MICRO-ANTENNES	43
DÉTECTION DES SUBSTANCES DANGEREUSES PAR LES ABEILLES	45
ANTENNES ET DÉTECTEURS ÉLECTRONIQUES : BIOCAPTEURS	47

MACHINES-INSECTES : ABEILLES CYBERNÉTIQUES	49
LES APPLICATIONS MILITAIRES DE L'APICULTURE	51
INTRODUCTION À LA BIOSURVEILLANCE	53
LES AVANTAGES DE LA BIOSURVEILLANCE	53
BIOMARQUEURS DE L'EXPOSITION AUX PESTICIDES CHEZ L'HOMME.....	56
L'UTILISATION DES ABEILLES COMME BIO-INDICATEURS	60
EXAMEN DE LA COMPOSITION CHIMIQUE DE L'AIR À L'INTÉRIEUR DE LA RUCHE.....	64
HYPOTHÈSE DE BIOSURVEILLANCE AVEC LES ABEILLES	66
CARACTÉRISATION DU SITE OÙ LA BIOSURVEILLANCE DOIT ÊTRE EFFECTUÉE.....	66
COMBIEN DE RUCHES UTILISER ET OÙ LES PLACER	67
RUCHE ÉQUIPÉE DE CAPTEURS PERMETTANT D'OBTENIR DES INFORMATIONS SUR LA SANTÉ ET LE COMPORTEMENT DES ABEILLES	68
INDICATEURS POUR L'ÉCHANTILLONNAGE DANS LES RUCHES	69
QUELLE MATRICE DE RUCHE ÉCHANTILLONNER POUR LA SURVEILLANCE DES MÉTAUX.....	70
BIOSURVEILLANCE DES RADIONUCLÉIDES DANS LES RUCHES D'ABEILLES.....	72
DÉTECTION DES HYDROCARBURES AROMATIQUES POLYCYCLIQUES	73
SURVEILLANCE DES PESTICIDES DANS LES DIFFÉRENTS PRODUITS APICOLES.....	73
QUELQUES INDICATIONS POUR LA BIOSURVEILLANCE	75
ÉCHANTILLONS DE MIEL	76
ÉCHANTILLONS DE CIRE.....	76
ÉCHANTILLONS D'ABEILLES	77
ÉCHANTILLONS DE POLLEN	78
ANALYSE PALYNOLOGIQUE ET CHIMIQUE POUR IDENTIFIER L'ORIGINE GÉOGRAPHIQUE	78
MATRICES ENVIRONNEMENTALES DE COMPARAISON	79
APTITUDE DE DIFFÉRENTS PRODUITS APICOLES À LA BIOSURVEILLANCE.....	80
BIOSURVEILLANCE ET GRADIENTS DE CONCENTRATION DE POLLUANTS DANS L'ENVIRONNEMENT	83
ÉCHANTILLONNAGE DE PRODUITS APICOLES.....	83
PRÉVENTION D'ÉVENTUELLES INTERFÉRENCES.....	84
MÉTHODES D'ANALYSE EN LABORATOIRE.....	84
L'UTILISATION DE BIOMARQUEURS MOLÉCULAIRES CHEZ LES ABEILLES	85
PESTICIDES : MANIFESTE D'UNE PRODUCTION ALIMENTAIRE NON DURABLE	86

CERTAINS MÉCANISMES D'ACTION DES PESTICIDES.....	86
CLASSIFICATION TOXICOLOGIQUE.....	89
UNE EXPÉRIENCE ASCENDANTE AUTODESTRUCTRICE.....	90
L'HERBICIDE LE PLUS VENDU AU MONDE : LE GLYPHOSATE.....	95
DDT : L'INSECTICIDE QUI A PERMIS DE VAINCRE LE PALUDISME.....	98
INSECTICIDES À BASE D'ORGANO-PHOSPHORATES ET DE CARBAMATES.....	100
PYRÉTROÏDES.....	100
LES INSECTICIDES PERTURBATEURS ENDOCRINIENS.....	101
L'UTILISATION D'INSECTICIDES VÉGÉTAUX : LES NÉONICOTINOÏDES.....	102
LES NÉONICOTINOÏDES DANS LES FLEURS.....	104
LES NÉONICOTINOÏDES DANS LES GOUTTES DE GUTTATION ET LA RÉSINE VÉGÉTALE.....	108
DES SUBSTANCES TOXIQUES À TRÈS FAIBLE CONCENTRATION.....	108
LES EFFETS SUBLÉTAUX DES NÉONICOTINOÏDES SUR LES ABEILLES.....	109
ASSURANCE TOXIQUE.....	112
LA TOXICITÉ DE CERTAINS INSECTICIDES POUR LES ABEILLES.....	114
LES PESTICIDES DANS LES PLANTES ET LES PRODUITS APICOLES.....	117
CONTAMINATION PAR LES PESTICIDES.....	117
LES PESTICIDES DANS LE POLLEN.....	118
LA CONTAMINATION DU POLLEN À LA SUITE DE L'UTILISATION DE SEMENCES IMPRÉGNÉES DE PESTICIDES.....	120
LES PESTICIDES DANS LE NECTAR ET LE MIELLAT.....	121
PESTICIDES EN GOUTTES DE GUTTATION.....	122
PESTICIDES DANS LA CIRE.....	123
LES PESTICIDES DANS LES ABEILLES EN RAISON DE L'EXPOSITION DANS LE CHAMP.....	123
DES ÉTINCELLES DE SENSIBILISATION : LES EFFETS TOXIQUES DES PESTICIDES SUR LES ABEILLES ET AUTRES INSECTES UTILES.....	126
INTRODUCTION.....	126
LIMITES DE L'ÉVALUATION TOXICOLOGIQUE PRÉVENTIVE POUR LES ABEILLES.....	128
LES EFFETS SUBLÉTAUX DES PESTICIDES SUR LES ABEILLES.....	129
RÉDUCTION DE LA CAPACITÉ D'APPRENTISSAGE OLFACTIF ET DE LA MÉMOIRE.....	131
ALTÉRATION DE LA CAPACITÉ D'ORIENTATION ET DE COMMUNICATION.....	132
AUTRES ALTÉRATIONS DU COMPORTEMENT.....	135
PROBLÈMES IMMUNITAIRES ET ENDOCRINIENS.....	135

EFFETS NÉGATIFS SUR LA REPRODUCTION	136
ALTÉRATION DU CYCLE DE VIE.....	137
LES PESTICIDES À ACTION ANTIMICROBIENNE	137
AUTRES ALTÉRATIONS	139
LES QUANTITÉS INFINETISAMALES NUISENT AUX BOURDONS.....	141
LES EXPOSITIONS À DE FAIBLES DOSES CHEZ LES INSECTES UTILISÉS DANS LA LUTTE BIOLOGIQUE.....	143
CONSIDÉRATIONS SUR LES EFFETS SUBLÉTAUX	146
LES PESTICIDES UTILISÉS DANS L'ÉLEVAGE DES ANIMAUX	147
PLANTES GÉNÉTIQUEMENT MODIFIÉES À ACTION INSECTICIDE	149
EXPOSITIONS MULTIPLES INÉVITABLES	150
INTRODUCTION AUX EFFETS SYNERGIQUES	152
CERTAINS EFFETS SYNERGIQUES.....	156
L'ÉVALUATION DES RISQUES N'EST PAS SIMPLE.....	160
L'ÉVALUATION DES RISQUES POUR LES AUTRES POLLINISATEURS.....	161
LES PESTICIDES SÛREMENT TRÈS DANGEREUX POUR LES ABEILLES	163
ABEILLES BIO-INDICATEURS D'UNE AGRICULTURE CHIMIQUE NON DURABLE.....	165
BIOSURVEILLANCES MONDIALES SUR LES PESTICIDES ET AUTRES MOLECULES COMME LES PCB (biphényles polychlorés)	165
ENQUÊTES SUR LES PESTICIDES ET AUTRES MOLECULES COMME LES PCB (biphényles polychlorés) MENÉES EN ITALIE.....	194
CONTAMINATION DES ABEILLES PENDANT LE SEMIS	205
CONCLUSIONS	206
CONTAMINATION PAR LE MÉTAL	208
LA POLLUTION DES MÉTAUX DANS LE SOL.....	208
MÉTAUX DANS LES PRODUITS APICOLES	211
ENQUÊTES INTERNATIONALES SUR LES MÉTAUX DANS LES PRODUITS APICOLES	213
QUELQUES RÉSULTATS ITALIENS SUR LA SURVEILLANCE DES MÉTAUX DANS LES PRODUITS APICOLES	217
DÉTECTION DE LA RADIOACTIVITÉ	221
SURVEILLANCE DE LA CONTAMINATION PAR LES MÉTAUX À L'AIDE DE FOURMIS ...	222
LA SURVEILLANCE D'AUTRES POLLUANTS, MICRO-ORGANISMES ET MALADIES	224
BIOSURVEILLANCE DES HYDROCARBURES AROMATIQUES POLYCYCLIQUES DANS LES VÉGÉTAUX	224

BIOSURVEILLANCE DES HYDROCARBURES AROMATIQUES POLYCYCLIQUES DANS LES PRODUITS APICOLES	226
LES MICRO-ORGANISMES DANS LE MIEL	229
LES ANTIBIOTIQUES DANS LE MIEL	229
SURVEILLANCE DES MALADIES DES VÉGÉTAUX PAR LES ABEILLES	232
RÉFLEXIONS SUR LA BIOSURVEILLANCE.....	234
EXPOSITION AUX PESTICIDES : LE VISAGE MORTEL DU PROGRÈS.....	234
QUELQUES CONSIDÉRATIONS PERSONNELLES	236
L'ÉDUCATION À L'ENVIRONNEMENT SUR LE TERRAIN	238
PESTICIDES : DES CONNAISSANCES IGNORÉES SUR DES DANGERS CONNUS DEPUIS LONGTEMPS.....	240
SI TOUT A UN PRIX, L'ENVIRONNEMENT DEVIENT UN LUXE.....	240
INTRODUCTION AUX DOMMAGES CAUSÉS PAR LES PESTICIDES	241
DÉTERMINER LE NIVEAU DE RISQUE ACCEPTABLE	242
LES PESTICIDES SONT DES SUBSTANCES TOXIQUES	244
LES PESTICIDES INTERFÈRENT AVEC LE SYSTÈME HORMONAL	249
LES PESTICIDES ET LA THYROÏDE	252
LES ALTÉRATIONS DE LA FERTILITÉ MASCULINE	253
UN SAVOIR SOUS-ÉVALUÉ.....	254
MIEL ET PESTICIDES	258
LES EFFETS NEUROTOXIQUES DES PESTICIDES	259
PATHOLOGIES RESPIRATOIRES.....	265
L'ACTION ANTIBIOTIQUE DES INSECTICIDES ORGANOPHOSPHORÉS.....	265
GLYPHOSATE ET MICRO-ORGANISMES INTESTINAUX.....	266
LES MICRO-ORGANISMES DANS LE SOL	267
LE GLYPHOSATE ET LA RHIZOSPHERE	268
CANCER.....	270
LA PROPAGATION DU CANCER EN EUROPE ET EN ITALIE	271
LE TABAGISME ET LES MODES DE VIE.....	273
PESTICIDES ET CANCER	276
LE RECENSEMENT DES CANCERS	279
CONTAMINATIONS MULTIPLES DÈS LES PREMIERS STADES DE LA VIE.....	281
EFFETS DE SYNERGIE	282
INCIDENTS	283

QUELQUES LIMITES DE L'ÉVALUATION TOXICOLOGIQUE PRÉVENTIVE	285
LE PRINCIPE DE PRÉCAUTION	287
DES SOLUTIONS INEFFICACES	288
LA CONVENTION DE STOCKHOLM	289
LE DÉFI DES COÛTS DES SOINS DE SANTÉ : LES DÉFICIENCES INTELLECTUELLES	290
DONNÉES SUR LES VENTES DE PESTICIDES EN ITALIE ET SURVEILLANCE DANS LES EAUX.....	292
LE RECENSEMENT DE L'UTILISATION DES PESTICIDES : UNE CÉCITÉ ORGANISÉE	299
CHOIX À IMITER	300
LUTTER CONTRE LA CONTAMINATION CHIMIQUE ÉVITABLE	301
LES ABEILLES AMBASSADRICES D'UN MONDE EN DANGER.....	303
LA MORT SOUDAINE DES ABEILLES.....	303
LE SYNDROME D'EFFONDREMENT DES COLONIES (<i>COLONY COLLAPSE DISORDER</i>)....	308
DILUTION MULTIFACTORIELLE	310
GESTION INEFFICACE DE LA PRÉVENTION DES RISQUES POUR LES ABEILLES : des intérêts particuliers au lieu du bien commun	312
LA POLLUTION CONTAMINE LES FLEURS SAUVAGES, LES OISEAUX ET LES INVERTÉBRÉS DANS LE SOL.....	316
LES PESTICIDES SONT PERSISTANTS.....	320
RÉSISTANCE AUX PESTICIDES	322
LA DÉSINFORMATION EST MORALEMENT INACCEPTABLE.....	322
LE RÔLE DE LA SCIENCE POUR LA DÉMOCRATIE.....	328
UN ÉCART ALARMANT ENTRE LES RESSOURCES SUR LE TERRAIN	331
LE RÔLE DES AUTORITÉS PUBLIQUES DANS LA PROTECTION DES INTÉRÊTS COLLECTIFS EST CONSTAMMENT COMPROMIS	332
DES ACCORDS COMMERCIAUX NON DÉMOCRATIQUES.....	336
LE RÉDUCTIONNISME GÉNÉRÉ PAR L'HYPERSPÉCIALISATION	337

DEUXIÈME PARTIE

RÉFLEXIONS SUR L'INCONSCIENCE ÉCOLOGIQUE ET LES CHOIX CONTRE LA NATURE.....	339
AU-DELÀ DES LIMITES ÉCOLOGIQUES	340
NATURE EN FAILLITE ET ESPACE OPÉRATIONNEL POUR L'HUMANITÉ	340
LE CIEL APPARTIENT À TOUT LE MONDE.....	343

LE SIÈCLE DERNIER : LIMITES PLANÉTAIRES ET SÉCURITÉ ALIMENTAIRE	344
L'APPROPRIATION NON DURABLE DE LA PRODUCTION PRIMAIRE	347
LA CONSOMMATION DE L'ÉNERGIE GÉNÉRÉE PENDANT DES MILLIONS D'ANNÉES :	
LE SOLEIL ENTERRÉ	351
L'AGRICULTURE INDUSTRIELLE ET CERTAINES LIMITES PLANÉTAIRES : CLIMAT, EAU ET SOL	352
L'AGRICULTURE EST UNE INDUSTRIE QUI TRANSFORME LE PÉTROLE EN NOURRITURE	354
PLUS DE 50% DES LÉGUMES CULTIVÉS NE NOURRIRONT PERSONNE	356
L'EMPREINTE ÉCOLOGIQUE DE L'ESPÈCE HUMAINE : NOUS DEVRIONS DEVENIR PLUS VÉGÉTARIENS.....	356
LES OCÉANS SONT EN DANGER	359
LE DILEMME ENTRE LA CROISSANCE INFINIE ET LA DIMENSION NON MATÉRIELLE DE LA PROSPÉRITÉ.....	361
ÉCOCIDE : L'ÉCONOMIE N'ACCEPTÉ AUCUNE LIMITE.....	366
UNITÉS DE MESURE	368
ÉNERGIE	370
LES EXTERNALITÉS CACHÉES DU CAPITALISME VERT	372
CHANGEMENT CLIMATIQUE.....	379
POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE ET TRANSPORT ROUTIER.....	379
CHANGEMENT CLIMATIQUE : TROP PEU, TROP TARD	381
JOUER AVEC L'AVENIR.....	385
LE CYCLE DU CARBONE.....	386
LE RÉVEIL DES GÉANTS	387
LE CHANGEMENT CLIMATIQUE NUIT À LA BIODIVERSITÉ ET À LA SÉCURITÉ ALIMENTAIRE.....	388
LA FRÉQUENCE DES PHÉNOMÈNES MÉTÉOROLOGIQUES EXTRÊMES AUGMENTE	390
CHANGEMENT CLIMATIQUE, POLLINISATEURS ET SÉCURITÉ ALIMENTAIRE	391
CHANGEMENT CLIMATIQUE ET ZOONOSES	393
APPAUVRISSMENT DE L'OZONE STRATOSPHÉRIQUE ET AUGMENTATION DE L'OZONE TROPOSPHÉRIQUE	394
DÉTOURNER L'ATTENTION AVEC DES INFORMATIONS SCIENTIFIQUEMENT ET MORALEMENT INCORRECTES.	395

LUTTER CONTRE L'IGNORANCE ET LES INÉGALITÉS POUR PRÉSERVER L'ENVIRONNEMENT ET LA SANTÉ	398
DÉGRADATION IRRÉVERSIBLE DES SOLS.....	401
LE SOL EST UNE RESSOURCE PRÉCIEUSE ET NON RENOUVELABLE	401
LE BÉTAIL, LES ENGRAIS ET LES SOLS	403
LA FERTILISATION ET L'APPORT DE MÉTAUX	405
LE COMPOST : FERTILISATION OU ÉLIMINATION DE SUBSTANCES DANGEREUSES ?..	408
LES FONCTIONS ÉCOLOGIQUES DU SOL SONT SOUS-ESTIMÉES.....	412
LA FERTILITÉ ET LA SÉCURITÉ ALIMENTAIRE SONT ÉTROITEMENT LIÉES : IL FAUT UNE CONSOMMATION ZÉRO DES TERRES.	414
CONTAMINATION DU SOL ET DE L'EAU PAR LES NÉONICOTINOÏDES	417
L'ALTÉRATION DES CYCLES BIOGÉOCHIMIQUES DE L'AZOTE ET DU PHOSPHORE	419
LA PRÉVENTION DE LA DÉGRADATION DES SOLS	420
L'EAU : UN BIEN PRÉCIEUX À PRÉSERVER	424
L'EAU, UN DROIT UNIVERSEL, PAS UNE MARCHANDISE	424
LE CYCLE DE L'EAU	426
L'EAU ET L'AGRICULTURE	427
AZOTE, PHOSPHORE ET EUTROPHISATION.....	429
HORMONES STÉROÏDIENNES DANS L'EAU	430
LA CONTAMINATION PAR LES ANTIBIOTIQUES	431
LES PESTICIDES CONTAMINENT DANGEREUSEMENT L'EAU	432
QUELQUES DÉRIVÉS ET MÉTABOLITES DE PESTICIDES QUI PEUVENT CONTAMINER L'EAU (et pas seulement).....	444
NOUS DEVONS DÉPLASTIFIER NOS VIES.....	450
L'ACIDIFICATION DES OCÉANS	455
L'EXPLOITATION NON DURABLE DES MERS	456
L'UTILISATION NON RENOUVELABLE DES RESSOURCES EN EAU	458
PLANTES GÉNÉTIQUEMENT MODIFIÉES : LA SERVITUDE PROGRAMMÉE	461
LES PLANTES GÉNÉTIQUEMENT MODIFIÉES.....	461
INSTALLATIONS D'OBSOLESCENCE PLANIFIÉE	464
UN PROJET EXEMPLAIRE D'ESCLAVAGE PLANIFIÉ : LE MAÏS HYBRIDE	465
DOMMAGES COLLATÉRAUX AFFECTANT LA COMMUNAUTÉ ET LES GÉNÉRATIONS FUTURES	469
ÉNERGIES ISSUES DE LA BIOMASSE : AGROMÉTHANE OU BIOGAZ.....	471

PEU CONTRE BEAUCOUP.....	471
LA PRODUCTION D'AGRO-MÉTHANE.....	472
LES AVANTAGES DE LA FERMENTATION ANAÉROBIE.....	475
AGRO-MÉTHANE PROVENANT DE CÉRÉALES ET D'EFFLUENTS D'ÉLEVAGE.....	476
L'APPROVISIONNEMENT D'UNE USINE DE BIOGAZ	478
LE BILAN ÉNERGÉTIQUE DE LA PRODUCTION DE MAÏS.....	479
LE BILAN ÉNERGÉTIQUE DE LA FILIÈRE BIOGAZ.....	480
RÉFLEXIONS SUR CERTAINS IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DE L'AGRO-MÉTHANE ISSU DES CÉRÉALES.....	483
LE RISQUE BIOLOGIQUE EST SOUS-ESTIMÉ	487
DES INCITATIONS GÉNÉREUSES ET RATÉES	489
LA MACHINE BUREAUCRATIQUE N'A PAS PROTÉGÉ LA COMMUNAUTÉ.....	493
CONSÉQUENCES D'UN EXEMPLE D'ÉCOCIDE PLANIFIÉ	494
UNE EXTERMINATION ÉCOLOGIQUE : LA DESTRUCTION IRRÉVERSIBLE DE LA BIODIVERSITÉ	497
LE PARADIS EST UN JARDIN	497
NOUS SOMMES ENTRÉS DANS L'ÈRE DE LA SOLITUDE	501
CERTAINES CAUSES D'EXTINCTION DES ESPÈCES NON HUMAINES	505
PARADIS PERDUS : DÉFORESTATION ET BIODIVERSITÉ.....	506
LA BIODIVERSITÉ DES INSECTES EN DÉCLIN.....	508
BIODIVERSITÉ ET SÉCURITÉ ALIMENTAIRE.....	511
LES POLLINISATEURS ET LA SÉCURITÉ ALIMENTAIRE	515
LA PERTE DE LA SOUVERAINETÉ ALIMENTAIRE ACCROÎT L'INSÉCURITÉ	518
EFFETS SUBLÉTAUX DES PESTICIDES SUR LA FAUNE SAUVAGE.....	519
LES OISEAUX ET LES POLLINISATEURS PARTAGENT LE MÊME SORT FUNESTE.....	521
LA DOMESTICATION DU PAYSAGE NATUREL EN ITALIE	524
CHASSE EN ITALIE	526
LES POLLINISATEURS EN ITALIE	528
LES COMPÉTITIONS ARTIFICIELLES ENTRE POLLINISATEURS	529
LES ÉCOSYSTÈMES MENACÉS PAR L'INTRODUCTION D'ESPÈCES ÉTRANGÈRES.....	533
ESPÈCES ALIENNES.....	533
LA VULNÉRABILITÉ DES ÉCOSYSTÈMES À L'INTRODUCTION D'ESPÈCES ÉTRANGÈRES	534
INVASION PAR DES ESPÈCES NON INDIGÈNES EN EUROPE.....	535

LA VITICULTURE ET L'INSECTE VECTEUR (EXOTIQUE) DE LA FLAVESCENCE DORÉE : DES CHOIX ÉCO-DURABLES.....	539
LES ESPÈCES NON NATIVES D'AMÉRIQUE	541
L'INVASION D'ESPÈCES NON INDIGÈNES EN AUSTRALIE	542
LA PROPAGATION DE CERTAINES MALADIES TRANSMISES PAR LES INSECTES	543
QUELQUES FACTEURS FAVORISANT LA PROPAGATION ARTIFICIELLE DES ESPÈCES	544
INTRODUCTION VOLONTAIRE D'ESPÈCES EXOTIQUES À DES FINS DE LUTTE BIOLOGIQUE	546
QUANTIFIER ET MONÉTISER LA DOMINATION DE L'HOMME SUR LA NATURE.....	547
LE VILLAGE AU DESTIN BIOLOGIQUE PROGRAMMÉ	550
AUTRES CATASTROPHES FUTURES PROBABLES : LE GÉNIE GÉNÉTIQUE	550
LA BIOTECHNOLOGIE OUVRE DE NOUVELLES FRONTIÈRES	551
APPLICATIONS EN MÉDECINE : THÉRAPIE GÉNIQUE	554
LA THÉRAPIE GÉNIQUE EST DÉSORMAIS UNE RÉALITÉ : LE CAS DU TRAITEMENT <i>STRIMVELIS</i>	555
UN ÉCHEC : LE TRAITEMENT <i>GLYBERA</i>	556
THÉRAPIE GÉNIQUE <i>ZOLGENSMA</i>	557
THÉRAPIE GÉNIQUE <i>LUXTURNA</i>	557
THÉRAPIE GÉNIQUE <i>ZYNTEGLO</i>	558
LA SÉLECTION HUMAINE ARTIFICIELLE : PROGRAMMER SON DESTIN GÉNÉTIQUE....	559
LA FÉCONDATION ASSISTÉE	559
ENFANTS DE TROIS PARENTS.....	560
HUMAINS GÉNÉTIQUEMENT MODIFIÉS AVEC LE SYSTÈME <i>CRISPR</i>	560
LA BIOTECHNOLOGIE NOUS AIDERA-T-ELLE OU AGGRAVERA-T-ELLE LES CHOSES ?	562
LES TECHNOLOGIES NE SONT PAS INFAILLIBLES	563
MODIFIER LES MICRO-ORGANISMES.....	564
CONCEPTION D'EMBRYONS HUMAINS : LE RÊVE DE L'ENFANT PARFAIT DEVIENDRA-T-IL RÉALITÉ ?	565
DES APPLICATIONS ÉTONNANTES ET EFFRAYANTES : IL N'EST NI DURABLE NI RAISONNABLE D'ATTEINDRE TOUT CE QUE L'ON PEUT RÉALISER.....	567
ABEILLES DOMESTIQUES GÉNÉTIQUEMENT MODIFIÉES	574
LES MOUSTIQUES ONT INFLUENCÉ LE DESTIN DE L'HUMANITÉ	577
LA SÉLECTION NON NATURELLE : LE CONTRÔLE GÉNÉTIQUE DES ESPÈCES ENVAHISSANTES OU CLASSÉES COMME NUISIBLES	580

LA FERME AVEC LE PROGRAMME GÉNÉTIQUE HUMANISÉ.....	590
LES COUTUMES QUI NUISENT À L'APICULTURE ET À L'AGRICULTURE	593
L'AGRICULTURE INDUSTRIELLE ENTRAÎNE UN MANQUE DE NUTRIMENTS POUR LES POLLINISATEURS	593
APICULTEURS MIGRATEURS : OPTIMISME AVEUGLE ET SURDITÉ SÉLECTIVE.....	595
LE NOMADISME DES BOURDONS : UNE EXPÉRIENCE DANGEREUSE.....	596
L'APICULTURE APPAUVRIT LES RESSOURCES ALIMENTAIRES DISPONIBLES POUR LES AUTRES POLLINISATEURS.....	598
QUELQUES ENNEMIS IMPORTANTS DES ABEILLES	600
L'APICULTURE MODERNE FAVORISE LA PROPAGATION DES MALADIES	603
LIMITER LE NOMADISME	605
LA SÉLECTION GÉNÉTIQUE ANTHROPOCENTRIQUE RÉDUIT LA BIODIVERSITÉ	607
PRATIQUES CONTRE NATURE	611
MONÉTISER LES SERVICES INDISPENSABLES DE LA NATURE : UNE APPROCHE RÉDUCTRICE ET ANTI-ÉCOLOGIQUE.....	614
LE SERVICE DE POLLINISATION INDISPENSABLE À LA SÉCURITÉ ALIMENTAIRE.....	614
DES PLANTES DIFFÉRENTES BÉNÉFICIENT DE POLLINISATEURS DIFFÉRENTS	615
L'ESTIMATION ÉCONOMIQUE DU SERVICE FOURNI PAR LES POLLINISATEURS	618
LA MONÉTISATION DU CAPITAL NATUREL EST RÉDUCTRICE ET DANGEREUSE : LES BIENS COMMUNS DOIVENT ÊTRE PROTÉGÉS.....	620
UNE AUTRE VISION DU MONDE DOIT ÊTRE POSSIBLE.....	622
FAIRE DU NEUF AVEC LE VIEUX ET IMITER LA NATURE	626
LES SIGNAUX NOUS ONT AVERTIS DEPUIS UN CERTAIN TEMPS.....	626
LA TRAGÉDIE DES BIENS COMMUNS	627
HORREURS DES RAPPORTS JUDICIAIRES SUR LES DOMMAGES BIOLOGIQUES CAUSÉS PAR L'ARSENIC	630
L'EXPLORATION DE NOUVELLES SOLUTIONS EST UNE NÉCESSITÉ	631
LA BIODIVERSITÉ DANS LES ENVIRONNEMENTS URBAINS.....	632
LA RESTAURATION DES ÉCOSYSTÈMES AGRICOLES VERS LA SEMI-NATURALITÉ	634
AUGMENTER LES CHANCES DE SURVIE DES ENNEMIS DES CULTURES.....	637
PROMOUVOIR LES AGRO-SYSTÈMES EN MOSAÏQUE	639
LA POLYCULTURE EST ÉCOLOGIQUEMENT BÉNÉFIQUE.....	640
LA ROTATION ANNUELLE DES CULTURES NE COMPROMET PAS LES OBJECTIFS ÉCONOMIQUES	641

L'EXTENSION DES CORRIDORS NATURELS	642
imiter les successions écologiques naturelles	648
LA FERTILISATION CHIMIQUE FAVORISE CERTAINS PARASITES DES CULTURES	649
RÉDUIRE L'UTILISATION DES PESTICIDES	650
LES LIMITES DE L'ÉVALUATION TOXICOLOGIQUE	654
DIVULGATION FAISANT AUTORITÉ, SCIENTIFIQUEMENT INCOMPLÈTE ET ÉTHIQUEMENT INCORRECTE.....	656
L'AGRICULTURE BIOLOGIQUE PRÉSENTE PLUSIEURS AVANTAGES.....	658
L'AGRICULTURE ÉCOLOGIQUE PEUT CONTRIBUER À ATTÉNUER LES CAUSES DU CHANGEMENT CLIMATIQUE	660
LA PRODUCTION INTÉGRÉE ET BIOLOGIQUE EN APICULTURE	662
RENDRE LA COMMUNAUTÉ ÉCO-ALPHABÈTE.....	666
CONCENTRATION DE L'OFFRE ALIMENTAIRE.....	671
ÉTIQUETAGE ET PUBLICITÉ.....	672
LA MONDIALISATION DE L'INDIFFÉRENCE	675
ARRÊTER LE TOURBILLON DE L'INESSENTIEL.....	677
IL N'EST PAS TROP TARD : nous sommes les maîtres de notre propre destin	679
REMERCIEMENTS.....	685
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES INDIQUÉES DANS LE TEXTE	687

INTRODUCTION

Avant-propos

Face à l'avalanche de nouvelles et de prévisions sur l'état de santé de la planète, nous hésitons entre incrédulité et alarmisme. Nous sommes conscients que nous sommes passés d'une ère contrôlée par la nature à une ère dite *Anthropocène*, c'est-à-dire dominée par l'espèce humaine, dont le rôle hégémonique s'accroît à un rythme croissant depuis plus de 8000 ans. La théorie de l'exclusion compétitive, c'est-à-dire la capacité d'une espèce à dominer les autres lorsque les ressources sont limitées, a atteint des niveaux inquiétants dans le cas de l'humanité car l'expansion rapide sature tout l'espace disponible. Les mathématiques appliquées à la biologie et l'observation de la nature nous enseignent que pour éviter de succomber, en l'absence de toute possibilité d'évasion puisque nous ne disposons pas d'une seconde planète, il est possible de modifier les habitudes en exploitant la multiplicité des comportements. Il n'y a pas de temps à perdre pour attendre la sélection naturelle de caractéristiques génétiques moins prédatrices et parasites de la biosphère. La connaissance peut favoriser la prise de conscience des changements nécessaires et, avec ce livre, nous espérons apporter une petite contribution à la diffusion de la culture environnementale. Le résumé de cet ouvrage se veut un cri d'alarme et une exhortation à participer à la rupture du silence. Un diagnostic de nombreuses tendances actuelles est proposé dans le but de mettre en évidence leur caractère non durable.

Nous assistons à la réduction systématique et constante d'une multitude d'animaux comme les insectes, avec l'idée générale que cette extinction galopante est inévitable. Attribuer cette extinction massive au fatalisme ou à une multitude de causes imparables et incontrôlables est une simplification excessive : un véritable écocide généré par une seule espèce.

Avec cette étude approfondie, qui a pour double fil conducteur les abeilles et la sécurité alimentaire, j'espère diffuser des connaissances importantes pour une prise de conscience indépendante. Une information plus large est probablement un levier essentiel pour faire face aux comportements égoïstes et peu clairvoyants motivés par l'avantage d'une petite fraction de la société. Il est nécessaire de construire une nouvelle culture écologique qui doit placer la santé des autres êtres vivants au sommet de l'agenda politique et des priorités économiques, puisque c'est de leur santé que découle celle de notre espèce. Dans de trop nombreux contextes, l'analphabétisme environnemental qui règne affaiblit la force soutenue par les valeurs de la connaissance scientifique et la corrode au point d'offenser l'intelligence.

J'ai écrit ce livre avant tout pour participer au changement. L'effort que cela m'a demandé m'a permis de transformer une partie du pessimisme et de l'inquiétude en une forme de lutte pacifique contre le système absurde que nous avons créé. La planification et la compilation de cette synthèse bibliographique, de preuves irréfutables et de réflexions utiles pour la formation d'une culture écologique, m'ont permis de canaliser le pessimisme en quelque chose qui, je crois, peut aider à planifier une issue. C'est ma contribution à la participation et à la collaboration civiques dans la planification d'un avenir différent de celui que nous encourageons. Je me sens impuissant face à la fureur des changements en cours et ce livre est une forme personnelle de plaidoyer pour la nécessaire transition écologique.

Bien que ce soit douloureux, nous pouvons nous estimer heureux d'être à l'origine du désastre environnemental qui est aujourd'hui de plus en plus évident et inquiétant, car nous aurions beaucoup moins de possibilités de nous défendre contre les forces de la nature et ses manifestations catastrophiques qui, aux yeux de l'humanité, sont impitoyables et inhumaines. Dans certains centres de pouvoir, l'environnement est traité comme s'il s'agissait d'un luxe que le marché et la finance ne peuvent se permettre qu'après avoir satisfait à des règles humaines

fondées sur l'ignorance des principes de base de la biologie, de la chimie et de la physique et soutenues par la présomption d'omnipotence. En fait, les théories économiques contemporaines, derrière une mathématique incompréhensible pour la plupart des gens, cachent une indifférence aux lois fondamentales de l'écologie et qui régissent notre santé. La confiance exagérée dans la capacité de contrôler et de manipuler arbitrairement l'environnement implique l'hypothèse erronée de l'inépuisabilité des ressources. La petite fraction de la société qui gère l'essentiel des richesses de la planète et, par conséquent, le sort de tous, est particulièrement touchée par un trouble psychologique : le délire de toute-puissance. Elle est supposée pouvoir intervenir dans la modification de la Planète en passant outre les lois de la nature, qu'elle considère à tort comme étant au service des intérêts économiques. La manifestation de l'omnipotence était autrefois réservée au pouvoir divin, surnaturel, mais aujourd'hui, grâce aux innovations technologiques et à la concentration du pouvoir, elle est devenue une manifestation dangereuse de l'imperfection de la société humaine. Ce pouvoir quasi-divin montre en fait sa fragilité si l'on observe qu'il est exercé contre quelque chose dont la capacité de défense n'est pas illimitée : le résultat sera un effondrement qui dépassera même les créateurs. Dans ce contexte, la manifestation du pouvoir contre la nature révèle la stupidité et l'incapacité à limiter la capacité d'autodestruction. La mégalomanie manifestée par les règles économiques justifie des actions qui génèrent des changements irréversibles et autodestructeurs, au-delà des possibilités de régénération offertes par la biosphère. L'ostentation de cette fragile grandeur engendre le gaspillage de ressources limitées et produit des changements dévastateurs et irréversibles. Malheureusement, nous ne sommes pas tout-puissants et n'avons pas un pouvoir infini sur la nature.

L'un des paradoxes de notre époque est qu'aujourd'hui les connaissances auxquelles chacun d'entre nous a accès sont infinies, mais cette opportunité ne favorise pas les freins inhibiteurs nécessaires. Un enfant muni d'un *smartphone* connecté à l'*internet* a potentiellement accès à plus d'informations que le chef d'une grande puissance il y a quelques décennies. Le savoir est donc en notre possession et il est facile de trouver des informations, mais cette opportunité ne se traduit pas par des mécanismes d'autoprotection. Pour la première fois, l'humanité doit avoir la capacité de s'abstenir de faire quelque chose qui est dans ses capacités.

Dans de nombreux contextes sociaux, il existe une prise de conscience généralisée de la nécessité de changer notre attitude à l'égard de l'environnement. Il est de plus en plus facile de rencontrer des personnes favorables à une meilleure démocratie, à un environnement plus propre et à une alimentation plus sûre, mais il leur est difficile de s'engager activement dans le changement. À l'heure actuelle, il semble difficile d'envisager des changements radicaux, à moins qu'un mouvement de masse ne soit impliqué. Une action globale est nécessaire, qui sera difficile à organiser à partir du sommet de la hiérarchie sociale (politiciens et entrepreneurs), car la classe dirigeante est largement soumise à des règles financières et économiques qui produisent d'importants bénéfices monétaires, principalement pour eux-mêmes, tout en gérant l'environnement de manière parasitaire et cannibale. Les comportements égoïstes prévalent au détriment de la collectivité, notamment parce que l'espèce humaine n'a jamais excellé dans la protection des biens communs, et c'est pourquoi davantage d'informations peuvent faciliter le passage de la sensibilité individuelle au comportement collectif. Les systèmes fondés sur la participation et le partage sont généralement plus démocratiques et plus souples, mais peuvent être redoutés par ceux qui ont des privilèges et du pouvoir.

L'incapacité manifeste et répétée d'éviter des catastrophes environnementales et sociales facilement prévisibles constitue une défaite morale, politique et évolutive sans précédent pour l'humanité. À l'avenir, la demande d'aliments, tant d'origine végétale qu'animale, devrait augmenter, de même que les besoins en énergie, mais cette croissance est devenue insoutenable en raison de la disponibilité limitée des ressources naturelles (combustibles fossiles, sols, eau propre) et des dommages causés à l'écosystème de la Terre (réduction irréversible de la

biodiversité, changement climatique). L'aveuglement avec lequel nous assistons au désastre environnemental et à la déstabilisation écologique constitue un crime intergénérationnel, qui n'a pas été abordé avec la détermination nécessaire. La diffusion d'informations pourrait peut-être encourager la formation d'une culture environnementale, favoriser une plus grande prise de conscience et un partage plus cohérent des équilibres naturels. Le caractère impitoyable des règles dictées par la nature devient très évident lorsque le matérialisme humain se heurte à la prédominance des forces naturelles, qui nous rappellent notre petitesse par des manifestations incontrôlables.

Le terme *Anthropocène* désigne une ère dans laquelle le monde est dominé par l'homme : l'ère de l'homme. La capacité de l'homme à déplacer et à modifier la matière, à consommer de l'énergie et à détruire la biodiversité a dépassé en intensité et en rapidité celle de nombreuses forces de la nature. L'homme est une nouvelle force agissant à l'échelle planétaire, capable de dégrader des continents entiers, de faire disparaître la plupart des écosystèmes et des espèces, de modifier les cycles de l'eau, de l'azote et du carbone, et de produire l'augmentation la plus forte et la plus prononcée des gaz à effet de serre dans l'atmosphère depuis des centaines de milliers d'années. Si nous ne mettons pas un terme à la croissance démographique mondiale, au pillage des ressources, à la pollution et à la destruction des écosystèmes naturels, l'effondrement économique, social et démographique suivra inévitablement très bientôt. Au niveau actuel d'exploitation des ressources de la planète, il n'est plus possible de considérer comme acquis que les écosystèmes seront en mesure d'assurer la subsistance des générations futures d'êtres humains. Les aspects négatifs comprennent : la perte de biodiversité, l'utilisation des terres, la raréfaction des ressources telles que l'eau, la perturbation des cycles biogéochimiques tels que l'azote et le phosphore, l'acidification des océans, la pollution et le changement climatique. Pour chacune de ces questions critiques, de nombreux comités d'experts ont déjà suggéré des seuils à ne pas dépasser pour assurer un avenir aux générations futures. Malheureusement, nombre de ces seuils, estimés selon des critères humains très égoïstes et partiaux, ont déjà été dépassés et continuent de s'aggraver, comme par exemple : la perte de biodiversité, la concentration atmosphérique de dioxyde de carbone, l'altération du cycle de l'azote, la dégradation des sols. En outre, la pollution chimique et biologique est largement sous-estimée.

LE FIL CONDUCTEUR : LES POLLINISATEURS ET LA SÉCURITÉ ALIMENTAIRE

À travers la narration des signes de souffrance enregistrés par le monde qui tourne autour des pollinisateurs, j'aborde dans ce livre des questions importantes telles que l'impact généré par la distribution indiscriminée de substances à action biocide telles que les insecticides et les herbicides. Nous devons réfléchir à la fragilité des services essentiels fournis par la nature, tels que les sols fertiles, l'air et l'eau non contaminés, et les effets des pesticides sur la santé humaine. Les insectes pollinisateurs, et en particulier ceux élevés par l'homme principalement pour répondre à des besoins économiques, envoient depuis longtemps des signaux d'alarme auxquels nous ne prêtons malheureusement pas l'attention nécessaire. Ces alarmes affectent la production alimentaire, qui n'est pas durable et qui, paradoxalement, est l'une des principales causes du changement négatif. Dans ce résumé, j'ai essayé de rassembler de nombreux éléments différents qui, examinés individuellement, ne donnent pas une perception adéquate de la gravité de la situation. La vision globale et unifiée, en revanche, est beaucoup plus inquiétante et devrait nous aider à accepter les limites de la biosphère dans laquelle nous pouvons évoluer, notamment pour préserver les générations futures.

Pour contrer l'impact de l'homme sur la nature, qui crée aujourd'hui des dommages effroyables à la biosphère, de nombreuses mesures ont été envisagées, mais elles se sont révélées fades et inefficaces. Les insectes pollinisateurs connaissent un déclin drastique sur toute la planète et, d'une manière générale, peuvent être considérés comme des enfants-vedettes efficaces de la faillite de la nature.

CONSIDÉRATIONS PERSONNELLES

L'une des raisons pour lesquelles j'ai décidé de m'attaquer aux difficultés liées à l'écriture est le désir de contribuer au changement par l'information. Le sentiment d'urgence généré par des présages négatifs clairs peut devenir une raison de réagir. Il existe deux grands types de chercheurs dans le domaine scientifique : le premier fait de la science et de la vulgarisation pour gagner sa vie et le second fait le contraire, c'est-à-dire qu'il trouve un moyen de gagner sa vie pour continuer à étudier et à s'engager librement dans la science. Quoi qu'il en soit, c'est la biophilie, c'est-à-dire l'amour du processus qui génère et entretient la vie, qui pousse probablement des milliards de neurones à écrire des livres qui seront lus par d'autres cerveaux. Mais ce n'est probablement pas seulement la biophilie qui m'a soutenu dans ce long et parfois interminable et fatigant voyage. Le sentiment d'impuissance et de frustration d'être entouré de personnes qui ignorent complètement des questions environnementales aussi importantes a été un élément vital. L'observation continue d'une dégradation irréversible et croissante, trop importante pour être contrée par des individus ou de petits collectifs, génère un sentiment d'incrédulité et en même temps de consternation. Comment peut-on laisser faire cela ? Un des outils dont je dispose actuellement pour tenter de participer activement au changement est de publier gratuitement le résumé d'une laborieuse recherche bibliographique. Certains passages de cette publication mettront en évidence un échec majeur du monde scientifique, comme celui de prévoir les avantages et les inconvénients de l'utilisation des pesticides, car il en a largement sous-estimé les dangers. La science a également échoué parce qu'elle n'a pas été en mesure de soutenir de manière adéquate des vérités inconfortables telles que celles concernant la réduction de la biodiversité, la dégradation des sols, les effets négatifs des pesticides ou le changement climatique. L'incapacité de la société à se défendre a entraîné l'humanité et la biosphère dans des conditions environnementales et écologiques inconnues dans l'histoire de l'évolution humaine jusqu'à présent. Nous sommes en train de déstabiliser de manière irréversible l'ensemble de l'écosystème : c'est une vérité dont nous devons nécessairement et enfin prendre conscience. Ce n'est peut-être que de cette manière qu'une pression généralisée et capillaire dirigée vers les politiciens et les entrepreneurs pourra encourager le changement drastique et urgent nécessaire à notre survie. Précisément parce que j'appartiens à la catégorie des chercheurs qui, pour continuer à s'intéresser librement à la science, doivent exercer un autre métier, je n'ai pas pu profiter de ce réseau de contacts, de relations professionnelles et d'outils qui auraient probablement pu améliorer la publication. Cependant, au prix de sacrifices, y compris matériels, j'ai décidé de rendre cet ouvrage, fruit de plusieurs années d'études et de recherches, librement accessible (le fichier PDF de ce livre est disponible gratuitement sur Internet à l'adresse <https://sites.google.com/site/zicari73/>). J'espère que cette petite contribution pourra encourager une plus grande sensibilité et une prise de conscience nécessaire pour sauver l'avenir. J'espère toujours pouvoir, un jour, me confronter face à face avec certains des auteurs des résultats scientifiques très intéressants que je résume et commente dans cette publication. L'activité de libre pensée par l'écriture est, dans mon cas, limitée par une communication à sens unique, car il n'a pas été possible d'avoir un échange concret et constructif avec les Auteurs des œuvres que je résume et commente, avec lesquels j'aurais été heureux d'échanger des points de vue.

Ce livre aborde diverses questions environnementales et présente une multitude de données, étayées par des centaines de références bibliographiques. Toute inexactitude dans la présentation des nombreuses données extrapolées de la littérature technico-scientifique et de l'expérience professionnelle peut être signalée : j'en serai reconnaissant et je procéderai à une mise à jour dans les éditions ultérieures. Entre-temps, je m'excuse par avance pour toute omission, erreur ou inexactitude, et je préviens que dans certaines parties sont présentées des données ou des estimations qui ne sont pas parfaitement concordantes entre elles, car elles sont le résultat de différentes méthodes de recherche et d'investigation qui, dans un souci de correction scientifique, sont néanmoins rapportées afin de faciliter des comparaisons et des réflexions plus objectives.

En résumé, le but de cet ouvrage, fruit de l'étude de centaines de publications et d'une certaine expérience professionnelle, est donc de partager des informations sur des sujets angoissants tels que la réduction de la biodiversité, le changement climatique et l'utilisation de pesticides. En outre, les pages qui suivent tentent de transmettre l'enthousiasme que suscitent les connaissances sur des sujets fondamentaux, ainsi qu'un sentiment d'urgence face à l'horreur qu'ils entraînent.

PREMIÈRE PARTIE

ABEILLES : BIOINDICATEURS D'UN MONDE EN DANGER

ABEILLES ET APICULTURE

LE SECTEUR APICOLE DANS LE MONDE ET EN ITALIE

Selon les données de l'*Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture*, la production mondiale de miel en 2018 était d'environ 1,86 million de tonnes. La production de miel est principalement concentrée dans trois continents : l'Asie représente à elle seule 49% (avec la Chine qui joue le rôle dominant), suivie de l'Europe avec 21% et du continent américain avec 18%. Les six premiers pays producteurs représentent plus de la moitié de la production mondiale, la Chine étant en tête avec une part de 29% de la production mondiale, suivie par la Turquie.^{341, 834} La production mondiale ne cesse de croître : en 10 ans, l'augmentation a été de 23%.

Entre 1961 et 2007, la production mondiale de miel a augmenté de 58% pour atteindre 1,07 million de tonnes par an (à partir de plus de 72 millions de colonies enregistrées en 2007). Dans la même période, le nombre de colonies a diminué de 26% en Europe et de 49,5% aux États-Unis. Aux États-Unis d'Amérique, au moins 5,9 millions de colonies d'abeilles ont été enregistrées en 1947, mais ce chiffre a diminué à environ 2,3 millions en 2008. L'essentiel de l'augmentation mondiale provient de l'Asie (426% d'augmentation sur la même période), de l'Afrique (130%) et de l'Amérique du Sud (86%).⁴⁸⁴

Les plus grands continents producteurs de miel au monde étaient, en 2017 :^{201, 202}

1. Asie 49,8% ;
2. Europe 20,78% ;
3. Amérique 17,93% ;
4. Afrique 10,69% ;
5. Océanie 1,52%.

Les plus grands pays producteurs de miel dans le monde enregistrés en 2017 étaient (par ordre décroissant) : la Chine (avec plus de 500.000 t), la Turquie (avec un peu plus de 100.000 t), l'Argentine (avec moins de 100.000 t), l'Iran, les États-Unis, l'Ukraine, la Russie, l'Inde, le Mexique et l'Éthiopie. Au niveau mondial, près de 400 millions d'euros de miel sont exportés chaque trimestre. Selon certaines enquêtes, le miel est le troisième produit le plus contrefait au monde.¹⁹⁶

L'Europe est le deuxième producteur mondial avec un total d'environ 17,5 millions de ruches et plus de 650.000 apiculteurs. Un secteur à la valeur économique limitée mais d'une importance inestimable pour l'agriculture, puisqu'il est responsable de 80% de la pollinisation des produits agricoles.^{834, 821} Selon les données recueillies par la Commission européenne, chaque apiculteur européen possède 21 ruches. Le résultat est la moyenne de données très différentes : en Grèce et en Espagne, chaque apiculteur possède plus de 100 ruches, alors qu'en Angleterre et en Allemagne, il n'en possède en moyenne que 6 ou 7. L'Italie, avec la France, compte en moyenne 27 ruches par apiculteur. Le rendement moyen de chaque ruche présente cependant des différences substantielles : alors qu'en Allemagne, chaque ruche peut donner une moyenne de 35 kg/an, en Grèce, elle ne donne qu'une moyenne de 9 kg/an. En France, le rendement moyen en 2017 était de 21,1 kg (il y avait 53.953 apiculteurs qui ont enregistré 1.344.185 ruches), alors qu'il était de 16,5 kg en 2016.²⁴³ Dans ce contexte, l'Italie est proche de la moyenne européenne avec un rendement de 25 kg/an. La production italienne de miel est garantie par plus de 1,47 millions de ruches (78% sont gérées par des opérateurs professionnels), dont environ 390.000 sont sédentaires et 556.000 nomades, le reste étant des ruches d'autoconsommation (plus de 173.000 ruches produisent du miel biologique). L'Italie est le quatrième pays de l'Union

européenne pour le nombre de ruches, après l'Espagne (2,9 millions de ruches), la Roumanie et la Pologne (respectivement 1,8 et 1,6 million de ruches). Le nombre de ruches enregistrées en Italie en 2018 a augmenté de 7% par rapport à 2017. Au moins 70.000 apiculteurs étaient enregistrés en Italie (règlement d'exécution UE n° 768/2013 de la Commission du 8 août 2013), dont 90% étaient classés comme non professionnels.⁸³⁴

La productivité annuelle de miel en Italie a été estimée, sur la base du nombre total de ruches recensées, à environ 22.000 - 23.000 tonnes.²²⁸ La production de miel en Italie est en constante diminution : de 2010 à 2017, la production a baissé de 39% (Eurostat). La production nationale annuelle de miel couvre environ 50% des besoins, le reste étant assuré par les importations, tandis que les exportations avoisinent les 3.000 tonnes. La production nationale de gelée royale s'élève à environ 4.000 kg et la production d'essaims est estimée à 350.000.²²¹

Les données de la base de données Apistica pour le recensement de novembre-décembre 2018, mises à jour au 1er mars 2019, montrent qu'il y a 55.877 apiculteurs en Italie, dont 36.206 produisent pour l'autoconsommation (65%) et 19.671 sont des apiculteurs avec TVA qui produisent pour le marché (35%). Les apiculteurs italiens détiennent un total de 1.273.663 ruches, dont 78% (984.422) sont gérées par des apiculteurs commerciaux qui élèvent des abeilles à titre professionnel.⁷⁴⁵ En 2018, la production de miel en Italie a été estimée entre 21.000 et 23.000 tonnes. La région qui compte le plus grand nombre de ruches est le Piémont. Les rendements en miel se situent entre 5 et 35 kg par ruche et la production peut varier considérablement selon les territoires, les saisons et les changements dans la gestion des ruches. Les apiculteurs nomades obtiennent généralement des rendements plus élevés. Les données de production moyenne par région en 2018 ont montré un rendement moyen par ruche pour les exploitations nomades professionnelles de :

- 33 kg/ruche pour les régions du Nord-Ouest et du Nord-Est ;
- 35 kg/ruche pour les régions centrales ;
- 22 kg/ruche pour les régions du Sud et les îles.

Ces données montrent un rendement moyen national d'environ 30 kg par ruche.

L'Italie importe beaucoup plus de miel de l'étranger qu'elle n'en exporte. Le prix unitaire des exportations est plus élevé que celui des importations. Le prix moyen du miel importé est d'environ 3 euros par kilo, tandis que la valeur du miel exporté varie entre 4 et un peu plus de 5 euros par kilo. En 2017, l'Italie a dépensé plus de 70 millions d'euros pour importer du miel, tandis qu'elle a exporté une valeur de plus de 30 millions d'euros. En 2018, l'Italie était le neuvième pays au monde en termes de quantité d'importations de miel, et le sixième en termes de valeur des importations de miel (150.000 tonnes de miel ont été importées dans le monde en 2018).⁷⁴⁵ Les importations en 2018 (janvier-septembre) provenaient principalement de Hongrie, de Roumanie et de Chine, tandis que les exportations provenaient d'Allemagne, de France et du Royaume-Uni.

La majeure partie du miel produit en Italie est vendue à la grande distribution. Les prix du miel varient de 6 euros par kilogramme dans les magasins *discount* à plus de 10 euros par kilogramme dans les supermarchés. Les prix de vente du miel ont augmenté de plus du double en une douzaine d'années (2006-2018), (ex : miel d'agrumes, de châtaignier, de fleurs sauvages). La valeur des ventes nationales de miel pour 2018 peut être estimée à 141,3 millions d'euros. Il existe également d'autres types de marchés associés à l'apiculture qui, bien que moins volumineux que les ventes de miel, sont importants. Pour donner quelques exemples : les colonies d'abeilles ont été vendues à des prix compris entre 75 euros et 140 euros par essaim (le prix varie selon la saison), les reines entre 13 et 15 euros chacune, le service de pollinisation avec des noyaux d'abeilles orphelines (sans reine et donc destinées à mourir au bout de quelques semaines) entre 24 et 55 euros (pour les légumes de serre comme les fraises, le melon, la pastèque, le chou), le service de pollinisation avec des ruches a été loué à des prix compris entre

20 et 40 euros par ruche (cerisiers, tournesols).⁷⁴⁵ L'activité de vente de miel est beaucoup plus rentable que celle de la pollinisation.²⁴⁵ En France, seuls 2,3% des revenus des apiculteurs sont générés par le paiement du service de pollinisation. La situation est différente dans d'autres parties du monde, comme l'Amérique du Nord, où ce service peut être très rentable (par exemple, dans les vergers d'amandiers).

La consommation de produits annoncés comme "plus verts", tels que ceux issus de l'agriculture biologique ou plus respectueux des principes de la production durable, est actuellement en hausse. Les abeilles sont utilisées comme marque pour promouvoir les *entreprises* qui s'auto-certifient "vertes", et donc respectueuses de l'environnement, depuis au moins 30 ans. Grâce à la promotion de marques et de stratégies publicitaires, on espère favoriser l'éducation à l'environnement et une meilleure prise de conscience écologique.

LES ABEILLES, GARDIENNES DE NOTRE AVENIR

Les abeilles et les pollinisateurs sont considérés comme les gardiens de notre avenir, car ils sont menacés par les modifications rapides et importantes apportées par l'homme. Les abeilles sont les ambassadrices des menaces qui pèsent sur les autres insectes, mais aussi sur les plantes et les autres animaux. Le rôle joué par les canaris dans les mines, qui cessaient de chanter pour avertir du danger des gaz dangereux et que les mineurs devaient quitter au plus vite, peut désormais être transféré aux abeilles pour le monde agricole et au-delà. En l'espace de quelques décennies, l'homme a réussi à saper de manière irréversible un contrat que la nature a établi au cours de millions d'années entre les plantes et les pollinisateurs tels que les insectes ; en fait, au moins 40% des invertébrés pollinisateurs sont en danger d'extinction.²³⁰

Il y a environ 120 millions d'années, des plantes à fleurs (appelées angiospermes) sont apparues sur Terre, apportant de nouvelles couleurs aux conifères et aux fougères.²⁴³ L'un des plus anciens fossiles d'insectes a été découvert dans l'ambre et a été daté de 80 à 100 millions d'années ; les premières espèces de guêpes étaient probablement végétariennes et sans dard.⁶⁸⁸ Les vraies abeilles sont apparues il y a 22 à 25 millions d'années. On pense que *Apis mellifera* et *Apis cerana* étaient deux espèces distinctes il y a déjà 2 millions d'années. Elles étaient géographiquement séparées au moins jusqu'à il y a 12000 ans, lorsque l'homme les a (tragiquement) mises l'une à côté de l'autre.

Le système respiratoire des insectes est constitué d'un réseau de trachées communiquant avec l'extérieur par des ouvertures appelées stigmates. Ce système est adapté aux petits animaux, c'est pourquoi il ne peut y avoir d'insectes de plus de 20 cm. Les insectes de plus grande taille existaient probablement lorsqu'il y avait plus d'oxygène dans l'atmosphère et qu'il faisait plus chaud.

Certaines plantes telles que les céréales comme le blé, le maïs, le riz ou le seigle dépendent du vent pour la pollinisation (elles sont appelées anémophiles) et représentent environ 20% des plantes (quelques rares plantes aquatiques dépendent de l'eau pour transporter le pollen) ; tandis que de nombreuses plantes à fleurs dépendent de pollinisateurs tels que les insectes, les oiseaux et les mammifères pour se reproduire. Outre les céréales, les autres plantes qui n'ont pas besoin d'abeilles sont les pommes de terre, les betteraves à sucre et les épinards. En résumé, les plantes les plus importantes pour fournir l'énergie nécessaire à l'alimentation humaine, comme les céréales, n'ont pas besoin des abeilles et des insectes pollinisateurs pour se reproduire.⁸⁶⁹ Nous savons également qu'entre 60 et 90% des plantes sauvages ont besoin, à des degrés divers, d'être pollinisées par un animal, par exemple un insecte.⁵⁸⁵ La majorité des plantes qui produisent des fleurs dépendent des pollinisateurs pour leur reproduction. On estime que 75% des plantes cultivées (87/115) dépendent à des degrés divers des pollinisateurs, et que le service rendu par

les pollinisateurs contribue à générer 35% de la richesse de la production agricole mondiale.^{230, 867} Selon une autre estimation, 90% des 107 cultures les plus importantes bénéficient à des degrés divers de la pollinisation par les abeilles. ⁴⁸¹En l'absence d'une bonne pollinisation entomophile, les fruits sont absents ou moins nombreux et plus petits, comme c'est le cas pour les pommes.^{232, 233}

Les plantes telles que le kiwi ne produisent pas de nectar, la substance sucrée produite par les plantes pour rendre réciproque l'action des pollinisateurs tels que les abeilles, mais seulement du pollen, elles peuvent donc être moins attractives. Pour d'autres plantes, la pollinisation par des insectes comme les abeilles est nécessaire pour obtenir des graines plutôt que des fruits, comme les carottes, le colza, les oignons, le persil, les navets et les choux.

Certaines cultures sont complètement dépendantes du travail des apiculteurs : les apiculteurs. En Amérique du Nord, on assiste à l'une des plus grandes migrations artificielles de la planète : au moins 1,6 million de ruches sont déplacées par camion vers des vergers d'amandiers californiens qui, autrement, ne seraient pas productifs. En quelques semaines, la plupart des abeilles se retrouvent dans cette région pour rendre un service utile et indispensable.

Pour introduire un aspect critique qui sera discuté en détail par la suite, il faut souligner que les pommes, comme celles cultivées dans la province de Trente en Italie, peuvent recevoir plus de 30 traitements entre mars et octobre, chacun avec un mélange de substances toxiques telles que :⁴⁷⁷

- fongicides (boscalid, captan, fluazinon, iprodione, penconazole) ;
- les herbicides (glyphosate) ;
- acaricides (bromopropylate) ;
- les insecticides (chlorpyrifos-éthyl, pyréthrinés, méthoxyfénoszoïde).

La distribution de ces pesticides se concentre pendant les mois de mai et juin, précisément la période de plus grande activité des abeilles dont elles dépendent pour la production de fruits.

Il existe déjà des endroits sur la planète où il y a des situations de dégradation apocalyptique où la pollinisation (par exemple les cerisiers en Chine) doit se faire manuellement en badigeonnant des grains de pollen collectés dans des zones où la floraison a commencé plus tôt. En Chine, on compte au moins six millions de colonies d'abeilles (*Apis mellifera* et *Apis cerana*) gérées par plus de 200.000 apiculteurs (certaines espèces indigènes comme *Apis cerana*, *Apis dorsata*, *Apis laboriosa*, *Apis florea* et *Apis andreniformis* sont présentes en Chine).^{585, 974}

Ce livre consacre une large place aux abeilles domestiques (*Apis mellifera*), dont la mortalité a augmenté de manière inquiétante. L'abeille domestique fournit un service de pollinisation qui est bien plus important que la production de miel. Pour cette raison, c'est probablement l'un des insectes les plus étudiés : la base de données *PubMed* d'articles scientifiques contient plus de 4.500 publications avec le nom *Apis mellifera* dans le titre ou le résumé. L'abeille domestique joue aujourd'hui un rôle indispensable dans la production alimentaire mais aussi dans le maintien de la biodiversité.

L'ÉCART DÉSARMANT GÉNÈRE UN SYNDROME D'AVEUGLEMENT CONSCIENT FACE À UNE CATASTROPHE PLANIFIÉE

La science qui analyse l'état de santé des populations et la qualité de l'environnement dans lequel elles vivent est plus à même de suggérer des prédictions que les indicateurs économiques tels que le produit intérieur brut (PIB). Certains indicateurs épidémiologiques font état de détériorations alarmantes ces dernières années : dans de nombreux pays européens, les femmes ont une espérance de vie plus faible et un état de santé plus mauvais qu'en 2010. En moyenne, les Européens avaient une espérance de vie en bonne santé de 62,2 ans en 2008, mais

de 62 ans en 2009. Cette réduction de la qualité de vie est enregistrée pour la première fois au cours des dernières décennies et constitue un indicateur alarmant.²⁰⁹ L'étude de la santé des abeilles est également un bon indicateur de la santé de l'environnement.

Si l'homme est le principal indicateur de tout, depuis 2000, le nombre de décès dus aux maladies non transmissibles (cancers, diabète, maladies cardio-circulatoires) dépasse celui des maladies transmissibles (maladies infectieuses). Malheureusement, les partisans de l'immobilisme (*business as usual*) rejettent l'existence des limites environnementales et des lois biologiques et naturelles, et sous-estiment qu'elles sont indépendantes des règles financières. La science produit continuellement de nouvelles informations à une vitesse effrayante et permet d'appliquer de nouvelles techniques. La connaissance progresse et découvre les risques liés à l'application de nouvelles techniques. Ainsi, la science, en plus de générer de nouvelles applications technologiques, devrait proposer des règles pour limiter les dommages générés par les technologies nées de ces nouvelles connaissances. Malheureusement, ce n'est pas le cas et des aspects très importants sont complètement ignorés ou confus. Dans certains cas, on génère un alarmisme qui détourne l'attention des causes réelles et des meilleures solutions. Le monde de l'apiculture représente assez bien certaines contradictions de notre société : des signaux clairs et des solutions simples, mais l'ignorance et les conflits d'intérêts dominent la scène au détriment de la communauté et des autres êtres vivants. Ce travail de synthèse vise à contrecarrer l'incertitude, le doute et la confusion souvent systématiquement et diaboliquement construits et semés par des écuries de techniciens et d'experts au service de grands intérêts économiques à court terme.

Depuis plusieurs années, il existe des preuves d'un déclin continu de la biodiversité à un rythme entre 1.000 et 10.000 fois plus rapide que celui qui aurait été mesuré en l'absence d'activité humaine. Cette extinction massive et rapide concerne les insectes, les animaux qui s'en nourrissent, comme les oiseaux, et les plantes qui ont entretenu des relations symbiotiques avec eux pendant de très longues périodes. Pourtant, cette disparition rapide, comme celle des abeilles domestiques ou des abeilles à miel, est souvent présentée comme un mystère, une énigme dont les causes inconnues doivent être recherchées, étudiées et explorées. Des expressions telles que "*mort subite des abeilles*" ou "*trouble de l'effondrement des colonies*" ont été inventées pour désigner cette mystérieuse disparition. Ce livre tentera de percer ce mystère, qui n'a en réalité aucun secret, si ce n'est ceux protégés par les brevets et autres intérêts industriels, bien protégés par des règles économiques et juridiques, même lorsqu'ils portent atteinte à l'intérêt collectif (par exemple, la santé et la durabilité). C'est le cas des recherches et des études menées par les entreprises chimiques pour tester la toxicité aiguë des pesticides sur les insectes tels que les abeilles. Il est incroyable que les informations nécessaires pour protéger le public ne soient produites que par ceux qui ont un conflit d'intérêt évident (les entreprises de pesticides) et ne soient pas disponibles pour le public. La documentation relative à l'analyse des risques ne peut être consultée que par les organismes qui ont le pouvoir de décider de la mise sur le marché. En fait, certaines informations peuvent également être dissimulées aux organes de contrôle et d'autorisation.

Il arrive rarement que la documentation scientifique parvienne à démontrer sans équivoque qu'une substance est très dangereuse pour l'homme (par exemple, qu'elle est définitivement cancérigène), et même dans ces cas, les intérêts économiques l'emportent souvent. Afin de mettre en évidence l'énorme fossé qui sépare ceux qui ont intérêt à commercialiser des milliers de substances chimiques avant de disposer d'informations toxicologiques fiables et ceux qui ont pour mission de protéger la santé collective et l'environnement, il est utile de souligner le fruit de 50 ans de travail d'une agence prestigieuse et bien connue. Le CIRC (Centre international de recherche sur le cancer) considère qu'une substance peut être évaluée en laboratoire comme cancérigène si elle est prise à une dose spécifique ou plus élevée, et ne pas être évaluée comme cancérigène à la dose à laquelle les gens

entrent en contact avec elle dans leur vie quotidienne.³⁰⁴ Comme indiqué sur le site web de l'Agence :

"S'il existe des preuves suffisantes de cancérogénicité chez l'homme, la substance est classée dans le groupe 1 ; s'il existe des preuves limitées de cancérogénicité chez l'homme, mais des preuves suffisantes chez les animaux de laboratoire, la substance est classée dans le groupe 2A ; s'il existe des preuves limitées de cancérogénicité à la fois chez l'homme et chez l'animal, la substance est classée dans le groupe 2B ; si les preuves sont insuffisantes, la substance est classée dans le groupe 3 ; enfin, si les preuves chez l'homme et les autres animaux indiquent une absence d'activité cancérigène, la substance est classée dans le groupe 4.

Le groupe 1 contient les agents cancérigènes certains pour l'homme et comprend (au moment de la rédaction) 120 agents ; le groupe 2A contient les agents cancérigènes probables pour l'homme et comprend 82 agents ; le groupe 2B comprend les agents cancérigènes possibles (302 substances au total) ; le groupe 3 comprend les substances qui ne peuvent pas être classées comme cancérigènes (il y en a actuellement 501) ; et le groupe 4 comprend les substances qui ne sont probablement pas cancérigènes pour l'homme (il n'y a qu'une seule substance dans cette catégorie, le caprolactame, un précurseur du nylon). Les listes CIRC, compilées depuis 1971 sur la base des études disponibles dans la littérature scientifique, ne comprennent que les agents qui ont été étudiés parce qu'ils étaient soupçonnés d'être cancérigènes. ".³⁰⁴

Depuis 1971, seules 1.013 substances ont été évaluées pour leur cancérogénicité, alors que des millions de molécules sont produites artificiellement par l'homme et distribuées massivement dans l'environnement (au moins 100.000 molécules ont été enregistrées et sont produites en grande quantité).

Cette Agence n'a pas accès aux études réalisées par les entreprises de pesticides, elle ne peut donc évaluer que les données issues de recherches publiées. Une recherche du mot herbicide parmi les substances (groupe 2B) génère le résultat de 2 substances : 2,4-D (acide 2,4-dichlorophénoxyacétique) et chlorophenoxy herbicides. Cet exemple met en évidence le déséquilibre des ressources entre ceux qui cherchent à gagner de l'argent à tout prix et ceux qui sont censés protéger la communauté. La charge de la preuve du danger est laissée à un système lent et inefficace qui n'a pas accès à toutes les informations nécessaires.^{280, 336} Entre-temps, les industriels gagnent du temps, car les substances ne peuvent être évaluées qu'après que des recherches scientifiques indépendantes ont réussi à publier un certain nombre de preuves cohérentes. Avec ce système, les entrepreneurs peuvent dormir tranquilles pendant des décennies. La preuve en est qu'au fil du temps, certaines des substances classées dans les groupes les moins dangereux passent dans les groupes les plus dangereux, suite à la publication de nouvelles études. Par exemple, la dioxine est passée du groupe 2 au groupe 1 en 1994. Cela signifie qu'une substance n'est classée dans le groupe 1 qu'après avoir déjà causé de nombreux cancers et décès. C'est la preuve que la prévention par des études toxicologiques en laboratoire ne fonctionne pas, surtout lorsqu'elles sont gérées presque exclusivement pour protéger des intérêts privés. Pour en revenir à la mort des abeilles présentée comme mystérieuse et définie par certains avec l'horrible acronyme CCD (*Colony Collapse Disorder*), il serait plus honnête de l'appeler le syndrome de l'aveuglement conscient face à un désastre planifié. Les symptômes révèlent une maladie très grave : la communauté continue de répéter ses erreurs et ses comportements autodestructeurs.

LA BIOLOGIE DES ABEILLES (*Apis mellifera*) : un exemple de société féminine de travailleuses infatigables, organisées et altruistes

Les insectes ont été parmi les premiers animaux à coloniser la terre il y a environ 400 millions d'années. Les insectes sont les organismes vivants de notre planète qui comptent le plus grand nombre d'espèces : plus d'un million ont été classées. En termes de biomasse, c'est-à-dire le poids des organismes vivants, on estime que 97% sont des plantes (et des champignons) et 3% des animaux, dont deux tiers sont des insectes.

Le nombre d'espèces de pollinisateurs est estimé à environ 40.000, dont au moins 25.000 sont des espèces d'abeilles classées et environ 2.000 vivent en Europe (la plupart sont des abeilles solitaires pour lesquelles peu d'informations sont disponibles).^{193, 230} Au moins 547 espèces d'abeilles sauvages ont été identifiées en Allemagne.⁸⁶⁹ Les insectes capables de polliniser sont appelés pollinisateurs : ils président au mariage. Les plantes ont développé un certain nombre d'astuces pour fidéliser certains insectes pollinisateurs et assurer ainsi le phénomène de constance des fleurs. L'évolution des abeilles avec les plantes à fleurs (angiospermes) a probablement commencé il y a plus de 100 millions d'années. On peut dire que les abeilles sont en effet les filles des fleurs.

Sur les milliers d'espèces d'abeilles décrites dans le monde, environ 50 sont gérées par l'homme et 12 sont couramment utilisées pour les services de pollinisation (*Apis mellifera*, *Apis cerana*, *Osmia lignaria*, *Osmia bicornis* (abeilles solitaires répandues en Europe), *Megachile rotundata* (abeille solitaire pollinisant la luzerne, les légumineuses et les carottes), *Bombus terrestris* et *Nomia melanderi*).^{364, 365, 481}

Le succès des abeilles domestiques est dû à un certain nombre de facteurs, comme leur capacité à réguler la température de la colonie et donc à résister au froid. En outre, les abeilles domestiques ne sont pas toujours les pollinisateurs les plus efficaces, mais elles vivent en colonies de milliers d'individus qui se déplacent sur des kilomètres. Une autre caractéristique des abeilles butineuses est la constance florale, c'est-à-dire la tendance à être fidèle au même type de fleur, contrairement à d'autres insectes comme les bourdons.²⁵⁴ En général, l'abeille à miel a tendance à visiter les mêmes types de fleurs si possible, tandis que seule une petite fraction explore de nouvelles ressources (5-7% des abeilles butineuses explorent de nouvelles fleurs).⁹⁷⁴

Nos ancêtres avaient déjà appris à récolter du miel il y a au moins 7000 à 8000 ans. La découverte de gravures dans des grottes de la côte nord de l'Espagne, datant de 6000 à 9000 ans avant Jésus-Christ, rappelle l'ancienneté de la relation entre l'homme et l'abeille : les Égyptiens et les Assyriens utilisaient autrefois la cire et le miel des abeilles pour l'embaumement.^{35, 81, 972} En Égypte, certaines des plus anciennes preuves d'une véritable apiculture ont été découvertes, remontant à 2400 avant J.-C.^{243, 254} Un papyrus datant de 256 avant J.-C. fait référence à un apiculteur possédant 5.000 colonies.⁹⁷⁴ Le miel était également un ingrédient de plus de 500 médicaments utilisés dans l'Égypte ancienne. Des traces de la pratique de l'apiculture ont été identifiées chez les Grecs (remontant à 650 avant J.-C.) et les Romains (remontant à 150 avant J.-C.).⁴⁸⁴ L'une des boissons alcoolisées issues de la fermentation du miel est appelée hydromel. Le vinaigre a également été découvert à la suite de la transformation de l'hydromel ou du vin en miel.

L'une des premières revues consacrées à l'apiculture remonte probablement à 1861 aux États-Unis : *American Bee Journal* ; tandis que l'un des premiers livres écrits en anglais sur l'apiculture remonte à 1568.⁹⁷⁴

Les produits des abeilles, comme le miel, sont également utilisés par les animaux : ours (ils se couvrent le visage de boue pour se protéger des piqûres), blaireaux, mouffettes, rats laveurs, rongeurs, renards, martres, singes et insectes tels que les coléoptères, les frelons, les fourmis, les guêpes (par exemple, le frelon ou la guêpe adulte se nourrit principalement de fruits

tandis que les larves sont carnivores), libellules, mantes religieuses et papillons de nuit (par exemple, le frelon ou la guêpe adulte se nourrit de jus sucrés obtenus principalement à partir de fruits, tandis que les larves sont carnivores), les libellules, les mantes religieuses et les papillons de nuit (papillons nocturnes). Les lézards, les hérissons et les loirs peuvent également se nourrir d'abeilles, et les souris peuvent se faufiler dans la colonie en hiver pour se réchauffer et se nourrir de miel, de cire, de pollen et des abeilles qui sont immobiles pendant cette saison.^{2, 35} Divers oiseaux se nourrissent d'abeilles, comme les mésanges, les guêpiers, les rouge-queue, les hirondelles, les hirondelles de fenêtre et les pies-grièches. Le guêpier les attrape en vol et est capable de retirer le dard et de les avaler. Il peut se positionner près de la ruche et se nourrir confortablement. Les pics (pics verts, par exemple) et les mésanges peuvent frapper les parois des ruches avec leur bec pour inciter un plus grand nombre d'entre elles à sortir et à se nourrir. Nous rapportons une symbiose très intéressante enregistrée en Afrique où un oiseau (*Indicator indicator*) guide le blaireau à miel (*Mellivora capensis*) vers les colonies d'abeilles. Après que le blaireau a pris sa part du butin, l'oiseau qui l'a guidé peut à son tour se nourrir. Ce comportement de l'oiseau africain, qui mène à la nourriture, c'est-à-dire à la ruche, a également été exploité par l'homme. Aujourd'hui encore, dans de nombreux endroits de la planète, des chasseurs de miel masculins s'attaquent aux ruches sauvages dans les forêts, bravant divers dangers (par exemple en Asie, en Afrique et en Amérique latine).¹⁹⁶ La couvée mâle est considérée comme un mets délicat dans des pays comme le Mexique, la Thaïlande ou l'Australie.⁹⁷²

Les abeilles sont des insectes appartenant à l'ordre des hyménoptères, comme les guêpes et les fourmis. Cette catégorie d'insectes est unie par des caractéristiques anatomiques telles que la présence de trois paires de pattes et de deux paires d'ailes. La plupart des abeilles sont solitaires, c'est-à-dire qu'elles ne forment pas de colonies (il existe au moins 14.000 espèces classées).¹³

Le genre *Apis* se trouve dans la sous-famille des Apinae et comprend huit espèces, dont : *florea*, *dorsata*, *cerana* et *mellifera*.¹⁷ Celles utilisées en apiculture sont *Apis cerana* (d'origine asiatique) et surtout *Apis mellifera* (d'origine européenne).² L'*Apis mellifera* comprend plusieurs sous-espèces : au moins 26 ont été classées. Selon certaines études, il existe 31 sous-espèces, dont 15 vivent en Europe et dans la région du Caucase. Les sous-espèces les plus importantes en Europe sont : *Apis mellifera mellifera*, *Apis mellifera ligustica*, *Apis mellifera carnica* et *Apis mellifera caucasica*.⁹⁷² En Europe, l'*Apis mellifera* sauvage n'existe probablement plus et les colonies trouvées peuvent ne pas être autosuffisantes car elles sont issues d'élevages.

Une ruche d'*Apis mellifera* est composée de 10.000 à 100.000 abeilles réparties en castes : une reine, plusieurs centaines de faux-bourçons (présents uniquement pendant la période de reproduction) et des abeilles ouvrières issues d'œufs fécondés (10.000 abeilles pèsent environ 1 kg).³⁵ À la fin des années 1600, la colonie d'abeilles était décrite comme un exemple de monarchie en harmonie avec le "roi" ; en 1800, on s'est rendu compte que la colonie était plutôt gouvernée par une reine.⁹⁹¹ Les mâles (les faux-bourçons) sont complètement dépendants de leurs sœurs car ils sont nourris par les abeilles ouvrières (par trophallaxie) ou peuvent prendre du nectar dans les cellules découvertes (celles qui ne sont pas fermées par un bouchon de cire).

La taille moyenne d'une abeille ouvrière est de 12-13 mm de longueur et de 130 mg de poids. Les faux-bourçons d'une colonie peuvent compter environ 200 à 300 individus, tous issus d'œufs non fécondés (parthénogenèse). Ces mâles ne sont présents qu'au printemps et en été. Globalement, une colonie peut produire entre 2.000 et 6.000 faux-bourçons par an. Il existe toutefois des exceptions à cette règle. Dans une colonie avec une reine, généralement moins d'une ouvrière sur 10.000 a des ovaires actifs, tandis que dans les colonies orphelines (sans reine), 10% des ouvrières sont capables de produire des œufs (les hormones produites par la reine jouent ici un rôle fondamental). Deux types de parthénogenèse sont donc possibles au sein de la colonie : celle de la reine, qui ne génère que des mâles (à partir d'œufs non fécondés), et

celle d'une petite fraction des abeilles ouvrières (généralement moins de 1%). Les abeilles femelles ont 16 paires de chromosomes tandis que les faux-bourçons en ont la moitié (les abeilles femelles auront environ 30.000 gènes dans 32 chromosomes tandis que les mâles en ont la moitié).

La reine des abeilles a la capacité de réguler la fécondation des œufs et peut donc, avec les abeilles ouvrières, modifier le nombre de mâles dans la colonie. Les faux-bourçons et les abeilles ouvrières vivent entre 30 et 50 jours.^{2, 17, 35} Les abeilles ouvrières nées en automne peuvent vivre jusqu'à 180 jours, les faux-bourçons d'été jusqu'à 90 jours, et la reine peut vivre entre 2 et 7 ans. En Italie, pendant la période printemps-été, une ruche de 50.000 abeilles a un taux de mortalité journalier d'environ 1%, soit environ 500 individus. Il s'ensuit qu'en quatre mois, toutes les abeilles d'une colonie ne sont plus les mêmes (sauf la reine). On suppose que les abeilles butineuses meurent après avoir parcouru un maximum de 800 km.⁹⁷⁴

Le système de reproduction des abeilles signifie que des reines différentes seront toujours fécondées par des mâles différents. Sans reine, la famille est condamnée à mourir, mais avec la génération de mâles, qui voleront à la recherche de reines, un moyen est ouvert pour étendre le pool génétique.

À partir de la deuxième année, la capacité des reines d'abeilles à pondre des œufs peut être réduite. C'est pourquoi les apiculteurs ont tendance à les remplacer avant la vieillesse. Une reine d'abeille peut s'accoupler en vol avec plusieurs mâles, généralement une seule fois dans sa vie, et peut stocker 5 à 7 millions de spermatozoïdes pendant plusieurs années. Dans la colonie, les mâles apparaissent généralement 3 à 4 semaines avant la génération des nouvelles reines.¹¹⁷⁹

Les reines vierges n'ont besoin et ne sont capables de s'accoupler que pendant une courte période de quelques jours au cours de laquelle elles pourront effectuer 1 à 3 vols d'accouplement pendant lesquels elles recevront tous les spermatozoïdes nécessaires pour toute leur carrière reproductive de 3 à 5 ans (de la copulation avec 6 et jusqu'à 24 mâles). Si l'organe copulateur du mâle reste coincé dans le vagin de la reine, il devra retourner à la ruche pour être nettoyé par les ouvrières. Lors de la copulation avec plusieurs mâles, la reine des abeilles reçoit beaucoup plus de spermatozoïdes qu'elle n'en a besoin, seule une partie (5-7 millions entre 80-170 millions, provenant de plusieurs mâles) sera stockée pendant des années dans la spermathèque.⁹⁷⁴ Dans la colonie, il y aura alors des abeilles ouvrières issues de pères différents, appelées super-sœurs (chaque groupe de super-sœurs aura le même père, il y en a autant que le nombre de pères).

Après l'accouplement, la reine des abeilles peut produire jusqu'à 1.500 à 2.000 œufs par jour, soit plus d'un œuf par minute.¹³ Si la reine des abeilles pond plus d'un million d'œufs au cours de sa vie, soit environ 200.000 œufs par an, cela signifie qu'elle génère 15 kg de larves par an. Chaque œuf pèse entre 0,03 et 0,1 mg, et après plusieurs mues, on obtient une abeille ouvrière de 120 mg ou un mâle de 277-290 mg.⁷⁶⁴ La reine des abeilles commence à pondre 2 à 5 jours après l'accouplement et pond environ 1.000 œufs en janvier et février. Elle pond ensuite 30.000 à 40.000 œufs en mai et juin, et continue à diminuer l'intensité de la ponte pendant l'été jusqu'à l'automne. Au cours de sa vie, la reine des abeilles peut produire plus de deux millions d'abeilles. Les 30.000 à 40.000 larves de 1,5 mm produites par la ponte en mai et juin pèsent plus de 2,5 kg.

Pendant les 3 premiers jours, les larves sont nourries avec de la gelée royale (3 mg/jour) et sont ensuite nourries avec un mélange de 50% de miel et 50% de pollen (12 mg/jour).¹³ La gelée royale est produite par les glandes des abeilles nourricières et est utilisée pour nourrir la reine et les larves au cours des premiers jours et n'est généralement pas stockée. On estime que 0,55 kg de gelée royale est consommé par an, 10 g pour la reine des abeilles et le reste pour les larves. La gelée royale contient des hormones produites par les abeilles ouvrières qui activent des gènes particuliers qui permettront la transformation des larves en reines d'abeilles.²⁵⁴

Les œufs fécondés donneront naissance à des femelles ouvrières (stériles) ou à des femelles reines (fertiles) en fonction du régime alimentaire des stades juvéniles. Les abeilles ouvrières,

grâce à leur régime alimentaire différencié, peuvent donc réguler le développement d'une larve en reine des abeilles. Toutes les larves sont nourries d'une sécrétion spéciale appelée gelée royale pendant les trois premiers jours, puis seules les larves destinées à devenir des reines continuent à être nourries de gelée royale, tandis que les autres larves sont nourries d'un mélange de miel et de pollen. Environ 125 mg de miel et environ 70-150 mg de pollen sont nécessaires pour nourrir une larve d'ouvrier.³⁵ Les œufs subiront 5 mues (dans le cas des ouvrières, la première a lieu 12 heures après l'éclosion, la deuxième a lieu après un jour et demi, la troisième a lieu après deux jours et demi et la quatrième a lieu le troisième jour). La larve va tisser une soie dans laquelle elle va se nymphoser et, après 5 jours, elle pèsera mille fois plus que lorsque l'œuf a éclos.

Le pollen est un aliment très important pour les larves. Le pollen frais est composé de 10 à 30% d'eau, 10 à 35% de protéines, 15 à 40% de sucres, 1 à 10% de lipides. Le pollen est une source importante d'acides aminés, de vitamines et de graisses (stérols).^{45, 107} Une étude menée en Pologne révèle que le pollen peut contenir entre 0,8 et 5,9% de matières grasses.¹⁸⁴ Les abeilles ne mangent pas le pollen frais mais après qu'il ait été traité et stocké : les abeilles mélangent le pollen récolté avec du miel et/ou du nectar, des sucres digestifs et des micro-organismes (par exemple, des bactéries lactiques acidifiantes), le transformant en ce qu'on appelle le pain d'abeille (le pollen frais non traité développe des moisissures, il ne se conserve donc pas). La réserve typique de pollen pendant l'été est de 2 kg et une colonie peut consommer 30 kg de pollen en un an. Le pollen est consommé par les stades juvéniles (environ 9,6 mg par jour) mais pas par les butineuses et est utilisé pour fabriquer la gelée royale.¹⁸⁴

La reine des abeilles a donc la possibilité de produire à la fois des œufs fécondés et non fécondés (plus rarement). C'est la gelée royale qui détermine le sort des stades juvéniles en les transformant en reines : la gelée royale est composée de miel (34%) et de la sécrétion des glandes mandibulaires des ouvrières. Elle se compose de 57 à 70% d'eau, de 6,8 à 20% de sucres, de 6,4 à 17% de protéines, de 1,3 à 1,7% de substances lipophiles (phospholipides, stérols, phénols, acides gras, glycérides et cire) et de 0,75 à 1,1% de minéraux et autres molécules (par exemple, la vitamine B5).¹³

Plusieurs larves destinées à devenir des reines peuvent être élevées en même temps dans la colonie, mais elles se battront jusqu'à ce qu'il n'en reste qu'une. Les cellules destinées aux reines en développement sont généralement construites dans les 48 heures suivant la mort de la reine, en raison de l'absence de la phéromone mandibulaire. Chaque larve destinée à donner naissance à une reine des abeilles reçoit au total 1.200 à 1.600 nourritures, soit 17 heures de travail.

Les œufs non fécondés donneront naissance à des faux-bourçons qui n'ont pas de dard et ne sont pas équipés pour collecter du pollen ou produire de la cire. Dans la ruche, les bourçons peuvent participer à la thermorégulation, à l'échange et au transport de nourriture. Le nombre de faux-bourçons ne dépasse généralement pas 10% du nombre de butineuses (les abeilles qui sortent pour butiner, c'est-à-dire collecter la nourriture, le butin). Entre 16 jours (par exemple la reine) et 24 jours (par exemple les faux-bourçons) sont nécessaires entre la ponte des œufs et la formation d'un adulte : la vitesse est également influencée par les conditions nutritionnelles et environnementales. Les faux-bourçons s'envolent chaque après-midi ensoleillé à la recherche d'une nouvelle reine jeune. S'ils en trouvent une, ils se jettent sur elle, essayant de devancer leurs rivales, et tentent de se rejoindre en vol à une hauteur de 10 ou 20 mètres. Lorsque le faux-bourçon ne parvient pas à établir le contact, il retourne chez lui et réessaie le jour suivant, et après l'accouplement, il meurt.

Le dard est présent chez la reine et chez les abeilles ouvrières, et lorsqu'elles piquent les humains, elles sont incapables de l'extraire, de sorte qu'il se déchire et reste collé. La piqûre prive l'abeille d'une partie de son système nerveux et d'éléments essentiels à sa survie, et elle meurt donc. Les abeilles ne perdent pas leur dard lorsqu'elles se piquent entre elles, elles ne meurent donc pas. Lorsqu'elles piquent, en plus de libérer un venin, elles sécrètent une hormone

d'alarme qui signale le danger aux autres abeilles. Pour éviter les piqûres, les apiculteurs portent des combinaisons de protection de préférence de couleur claire, sans doute aussi pour ne pas ressembler à un redoutable ennemi de la colonie : l'ours. Il existe une production commerciale de venin d'abeille : à partir de 10.000 abeilles, il est possible d'obtenir plus d'un gramme (l'une des premières méthodes développées pour extraire le venin est l'utilisation du *choc* électrique).
974

Les abeilles perçoivent les rayons ultraviolets, le bleu et le vert, mais ne voient pas la couleur rouge. Une abeille qui butine des fleurs artificielles préférera, pour la même récompense, les fleurs bleues aux fleurs blanches ou jaunes. Les abeilles sont capables de produire et de percevoir des sons et des vibrations, et de générer diverses phéromones (le type de communication par les vibrations reste largement inconnu).^{20, 254} La reine des abeilles peut émettre des sons, et lorsque l'abeille vierge les émet, les ouvrières environnantes deviennent immobiles (l'organe récepteur des sons est situé dans les antennes).⁹⁷²

Les abeilles ouvrières produisent différents types d'hormones pour signaler l'alarme ; à la suite de ce signal chimique, le nombre d'abeilles qui s'envolent augmente ainsi que l'agressivité. Le signal chimique placé sur une cible est poursuivi et piqué par plusieurs abeilles.

Les hormones sécrétées par la reine des abeilles à partir d'au moins six glandes différentes sont également très importantes. Parmi ces hormones, on trouve

- celles déposées sur la cire pour empêcher la construction de cellules pour d'autres reines d'abeilles ;
- celles qui apaisent l'agressivité des ouvrières envers la reine des abeilles et l'attirent vers elle ;
- celles qui maintiennent les ovaires des ouvrières atrophiés.

Les hormones produites par les abeilles comprennent celles produites par la glande de *Nasonov*, qui sont utilisées pour marquer les sites de pillage, pour faciliter la découverte de la ruche et pour encourager l'agrégation des essaims. Les glandes mandibulaires des abeilles ouvrières sont capables de marquer les fleurs visitées, générant une répulsion de leurs sœurs, car elles ont été vidées de leur précieux butin. Les fleurs visitées peuvent également être répulsives pour d'autres espèces telles que les bourdons pendant plus de 40 minutes. Pendant ce temps, la fleur produit davantage de nectar. Les abeilles visitent également les fleurs qui ne produisent pas de nectar si elles peuvent fournir du pollen, comme c'est le cas des roses, des coquelicots et des hélianthèmes. On peut dire que le nectar est la forme de salaire inventée par les plantes pour payer le service de pollinisation et le rendre ainsi moins cher. Les plantes peuvent produire différentes quantités de nectar par fleur et par jour (mg de sucre/fleur/jour) :⁸⁶⁹

- framboise 3,8 ;
- pomme 1,37 ;
- cerisier entre 0,5 et 1,27 ;
- colza 0,79 ;
- trèfle rouge 0,19 ;
- tournesol 0,12 ;
- poirier 0,09.

Le nombre d'abeilles ouvrières varie dans le temps, allant d'environ 10.000 en hiver à 100.000 en juin, puis diminue à nouveau. Si le nombre d'abeilles baisse en dessous de 4.000 pendant l'été, la colonie s'effondre. Un rôle important dans l'immunité de la colonie est joué par une enzyme sécrétée par les glandes hypopharyngiennes et présente dans le miel et la gelée royale (glucose oxydase). Cette protéine enzymatique produit des substances aux propriétés antiseptiques en présence d'eau et d'oxygène (le glucose génère de l'acide glucuronique et du peroxyde d'hydrogène).³⁵

Les abeilles ouvrières ont différentes fonctions en fonction de leur âge (elles vivent 40-45 jours en été et celles qui sont nées en automne et passent l'hiver à l'intérieur de la ruche peuvent vivre jusqu'à 6 mois) : ^{13, 35, 56}

- Les abeilles ouvrières de moins de deux semaines ne quittent pas la ruche, elles nettoient les cellules, nourrissent les larves (également au moyen de sécrétions spéciales) et s'occupent de la reine.
- Les abeilles ouvrières, âgées de 12 à 18 jours, s'occupent du stockage du pollen et du nectar, produisent de la cire grâce à quatre glandes spéciales qu'elles possèdent dans la partie inférieure de leur abdomen et éliminent les individus morts. Il peut y avoir 550 insectes dans une ruche, ou beaucoup plus si nécessaire, chargés d'éliminer les abeilles mortes ou infectées par des virus.
- Les abeilles de plus de 20 jours deviennent des abeilles exploratrices-récolteuses : ce sont les abeilles dites *butineuses*, capables de voler à 20 km/h et jusqu'à 12 km de la ruche ; environ 20% des abeilles butineuses passent un ou deux jours à garder l'entrée de la ruche, ce qui leur donne le temps d'apprendre à s'orienter. La plupart du miel provient du nectar récolté pendant quelques semaines de l'année.
- D'autres fonctions réalisées après le quinzième ou vingtième jour de vie des abeilles ouvrières, qui sont maintenant adultes, sont de bouger leurs ailes pour ventiler et refroidir, de bouger leurs muscles de vol sans bouger leurs ailes pour élever la température, qui est maintenue à environ 34-35,5°C même en hiver. Pour faire baisser la température, elles peuvent aussi faire évaporer de l'eau prise spécialement à cet effet. En hiver, les abeilles peuvent rester à l'intérieur de la ruche et maintenir une température constante pendant des mois. Les abeilles si elles ont à disposition de l'eau, exposées de manière expérimentales à 70°C peuvent maintenir une température d'environ 35°C. En revanche, une abeille exposée à 46°C meurt généralement en une heure environ. ⁷⁶⁴ Une fraction des abeilles (1 ou 2%) régule la température à l'intérieur de la ruche et peut décider de le faire pour contrer la propagation d'une maladie. ²³⁰ De petites variations de température peuvent nuire aux abeilles. Par exemple, les faux-bourçons exposés à des températures de 40°C pendant quelques minutes ont un taux de mortalité des spermatozoïdes de plus de 40% (aux états juvéniles, pendant la formation de la chrysalide, 32°C provoque des anomalies du système reproducteur mâle). ⁹⁹¹
Les abeilles transforment le miel, le pollen, la propolis et la cire.

Les abeilles ouvrières, dans la dernière période de leur courte vie, visitent quotidiennement des milliers de sites pour récolter du pollen, du nectar, du miellat (sécrété par les pucerons, notamment dans les forêts de conifères) et de l'eau. ⁵⁸ Elles collectent également les résines produites par les plantes car elles servent à produire la propolis qui est utilisée comme matériau de construction ou comme colle, pour rendre une zone étanche ou pour embaumer les intrus. Pour ces raisons, elles constituent un excellent échantillon de la région. La quantité moyenne de matières recueillies dans une ruche en un an est 240 kg de nectar, 30 kg de pollen, 10 kg d'eau et 0,1 kg de résines. ¹³ Seule une petite proportion de butineuses (environ 5%) collecte à la fois du pollen et du nectar. Les abeilles éliminent leurs excréments en vol à l'extérieur de la ruche.

Certains produits de la ruche sont, pour ainsi dire, permanents, comme la cire et la propolis, bien que, par exemple, la cire de la ruche soit continuellement consommée et reconstruite. D'autres sont consommés en permanence. La quantité de matériaux produits quotidiennement dans une colonie sont (nous considérons la production pendant 8 mois de l'année) : ¹³

- 0,238 dm³ de miel correspondant à une production de 80 kg par an ;

- 0,178 dm³ d'alimentation des larves correspondant à une consommation de 25 kg par an de miel et 25 kg par an de pollen ;
- 0,00231 dm³ de gelée royale correspondant à une consommation de 0,61 kg par an ;
- 0,000648 dm³ de cire correspondant à une production de 0,15 kg par an.

L'intensité des vols et le nombre d'abeilles collectant le pollen et le nectar sont également régulés par les stocks accumulés dans la ruche. Par exemple, si plus de 10% des cellules sont remplies de pollen, le nombre d'abeilles qui sortent à la recherche de nourriture diminue. Les abeilles ont tendance à accumuler des stocks de pollen pour faire face à au moins 3 jours. Le nombre d'abeilles retournant à la ruche pour livrer du nectar à d'autres abeilles peut être d'environ 30 abeilles par minute et, dans la ruche, plus de 1.800 abeilles peuvent être occupées à recevoir du nectar et à le distribuer aux cellules toutes les heures.¹³

LE SERVICE DE POLLINISATION

Environ 73% des plantes cultivées sont pollinisées par l'une des 25.000 espèces d'abeilles répertoriées.¹⁹³ Au moins un tiers de la production alimentaire (en volume) dépend de la pollinisation par les insectes.⁴⁵ 70 des plus de 100 espèces végétales majeures que nous mangeons sont pollinisées par les abeilles : pommes, amandes, poires, fraises, tomates, carottes, brocolis, olives, oignons, cacahuètes, avocats, cerises, myrtilles, luzerne et tournesols.^{2, 17, 45} Le tournesol (*Heliantus annuus*) est cultivé pour la production d'huile et il est pollinisé dans le monde entier principalement par les abeilles domestiques, bien que les pollinisateurs les plus efficaces soient les abeilles sauvages.⁴⁷⁶ Les abeilles jouent également un rôle très important dans la pollinisation des espèces sauvages. En 2009, les bénéfices générés par les pollinisateurs pour l'économie étaient déjà estimés à un chiffre considérable, qui ne suffit toutefois pas à souligner leur importance : 153 milliards d'euros, dont 80% sont attribués aux abeilles domestiques.^{55, 75}

Le service de pollinisation dépend également d'autres insectes et d'autres animaux comme les chauves-souris ou certains oiseaux (par exemple, les colibris). Pour donner un exemple, sur les 160 millions d'hectares cultivés en Inde, environ 55 millions dépendent de la pollinisation. Le service de pollinisation est tellement nécessaire pour certaines productions végétales que les agriculteurs sont prêts à payer, pendant les 20 jours de floraison, entre 30 et 60 euros par ruche.¹⁹⁶ En Italie, la principale source de revenus des apiculteurs provient de la vente de miel. Dans d'autres pays, la principale source de revenus des apiculteurs est précisément la fourniture du service de pollinisation payé par les agriculteurs (par exemple, aux États-Unis). Par exemple, les producteurs d'amandes de Californie, qui ont besoin d'au moins 5 à 6 ruches pour chacun de leurs 380.000 hectares, ont payé entre 50 et 200 dollars (par exemple en 2009) par ruche au fil des ans.²⁴³ Ce service est souvent assuré par des essaims jetables, c'est-à-dire des groupes d'environ 20.000 abeilles dans une ruche en carton que l'on laisse mourir, car ils sont vendus dans le seul but d'assurer le service de pollinisation pendant les 2 ou 3 semaines de la floraison ; il est utile de rappeler qu'une colonie au printemps peut atteindre plus de 60.000 individus, que les abeilles ouvrières vivent entre 40 et 60 jours et qu'une colonie sans reine est destinée à s'éteindre en peu de temps. L'un des paradoxes de la culture des amandes en Californie est le besoin en eau d'irrigation dans une région qui a longtemps souffert d'une grave sécheresse. Il faut environ quatre litres d'eau pour produire une amande, bien plus que pour produire une fraise ou un grain de raisin. Pourtant, la région de Californie où sont cultivées les amandes a souffert d'une grave sécheresse ces dernières années. Pour compenser le manque de pluie, la production a été maintenue par la consommation d'eau souterraine. Cette stratégie n'est pas durable et entraînera de graves problèmes.

Les colonies de bourdons peuvent également être vendues à cette fin : par exemple pour polliniser les tomates dans les serres. Comme alternative au paiement, l'agriculteur qui autorise le positionnement des ruches peut recevoir en échange une partie des produits apicoles (par exemple le miel).

Les abeilles ouvrières sont très fidèles à la source de nourriture pendant leur courte vie, car elles ne sont pas facilement distraites par d'autres fleurs : les abeilles butineuses qui choisissent de chercher des fleurs ailleurs alors que la source primaire est toujours présente sont entre 0,8% (*Apis mellifera mellifera*) et 14% (*Apis mellifera ligustica*).^{35, 192}

Les abeilles échantillonnent facilement la zone jusqu'à 2 ou 3 km de la ruche : généralement, si la nourriture est disponible, elles ne se déplacent pas plus loin que 1,5 km. Exceptionnellement, elles volent jusqu'à 10-12 km de distance ; dans le but de réduire la consommation d'énergie, comme on peut s'y attendre, cherchant de la nourriture et de l'eau aussi près que possible de la ruche.¹⁷ Chaque jour, les abeilles d'une ruche effectuent des dizaines de milliers de voyages à la recherche de nourriture. Environ 50% des abeilles d'une ruche sont des abeilles butineuses, c'est-à-dire des insectes qui partent à la recherche de nourriture ou d'eau : même plus de 20.000 abeilles, dont au moins 10% sont occupées à collecter de l'eau. Une colonie consomme plusieurs dizaines de litres d'eau par an, jusqu'à 40 L/an : de 40 g par jour et par abeille à environ 300 g par jour et par abeille en été.³⁵ Dans les pays très chauds, une colonie peut consommer entre 0,5 et 5 litres d'eau par jour.⁶⁹

Les abeilles butineuses effectuent 12 à 15 vols par jour lorsque les températures se situent entre 20°C et 25°C. Environ 5 millions de fleurs doivent être visitées pour produire un demi-litre de miel. Chaque abeille butineuse peut visiter plus de 1.000 fleurs par jour et transporter des dizaines de milliers de grains de pollen. Pour produire un litre de miel, 2.500 abeilles doivent travailler pendant environ trois semaines. A la fin de l'été, elles peuvent avoir accumulé plusieurs dizaines de kilos de miel dans la ruche, devant effectuer entre 100.000 et 150.000 vols de nourrissage par kilo de miel.⁷¹ Au total, si une abeille parcourt en moyenne trois kilomètres, elle aura parcouru au moins 170.000 km pour fabriquer un kilo de miel.²⁵⁴

LE MIEL

La production de miel par ruche et par an se situe entre 20 et 40 kg, voire plus dans des conditions exceptionnelles. Le miel est produit à partir du nectar recueilli sur les fleurs. Le nectar est une solution sucrée et il est également produit par d'autres parties de la plante telles que les feuilles, le tronc, les pétioles (on parle alors de nectars extra-floraux, comme ceux produits par les cotonniers et les myrtilles).⁹⁷⁴ Le nectar peut être composé de nombreux types de sucre différents, tels que le saccharose, le fructose, le glucose, le maltose et le tréhalose. Certains types de nectar peuvent contenir des sucres qui réduisent l'espérance de vie des abeilles, tels que les monosaccharides arabinose, mannose, xylose et galactose, et les oligosaccharides contenant du galactose (par exemple, le lactose).¹⁰⁷

De nombreuses propriétés ont été attribuées au miel, mais elles doivent être vérifiées et contextualisées puisqu'il s'agit essentiellement d'eau et de sucre, telles que des propriétés antioxydantes, anti-inflammatoires, cardio-protectrices et antitumorales.⁴⁷⁷ Le miel provient du nectar produit par les plantes (le nectar a une concentration en sucre de 20-40%) et il est composé principalement de sucres simples (70-80% de glucose et de fructose), le reste d'eau (moins de 18%) et en petites quantités d'autres substances comme le pollen (le miel de miellat ne contient pas de pollen) et les polyphénols (ils ont des propriétés antioxydantes).⁴⁷⁷ Le miel a une densité d'environ 1,39-1,44 kg/dm³ (à 20°C), c'est-à-dire qu'un litre pèse entre 1.390 et 1.440 grammes.³

La teneur minimale en sucre du miel doit être de 60% de glucose et de fructose, il ne doit pas contenir plus de 5% de saccharose et il doit contenir moins de 20% d'eau (le miel contenant plus de 19% d'eau est susceptible de fermenter s'il n'a pas été pasteurisé ; la teneur en sucre peut être mesurée à l'aide d'instruments spéciaux, notamment des réfractomètres). Des minéraux et des acides sont également contenus : le pH est généralement compris entre 3,5 et 6,0 (par exemple, le pH du miel d'acacia est acide, environ 3,9).

Plus de 300 substances chimiques naturelles différentes ont été identifiées dans le miel, dont au moins 20 types de sucres différents et 30 polyphénols différents ; en sont exclues^{35, 477} les substances fabriquées ou utilisées par l'homme, comme les pesticides et les différents types de pollen. Il peut y avoir entre 100 et 100.000 grains de pollen dans chaque gramme de miel : le miel contient du pollen provenant de nombreuses plantes différentes.

Quatorze éléments sont présents dans le miel : calcium (Ca), magnésium (Mg), potassium (K), sodium (Na), phosphore (P), cobalt (Co), manganèse (Mn), fer (Fe), chrome (Cr), nickel (Ni), zinc (Zn), cuivre (Cu), cadmium (Cd) et plomb (Pb). Dans les miels clairs, les minéraux sont généralement présents à une concentration de 0,04%, mais dans les miels foncés, ils peuvent être présents à une concentration de 0,2%.⁷⁵⁴

Le miel contient également un certain nombre de vitamines hydrosolubles, dont la plupart sont contenues dans le pollen, ainsi que diverses enzymes (protéines à action catalytique) qui sont modifiées par le traitement thermique. La concentration de protéines est généralement inférieure à 0,5%.⁷⁵⁴ En mesurant la présence de protéines et leur fonctionnalité, il est possible de savoir si le miel a été soumis à des températures élevées : les traitements thermiques sont interdits (par exemple, plus de 60°C). Un autre indicateur utilisé pour mesurer la fraîcheur du miel est la concentration en *hydroxyméthylfurfural*. Cette molécule est pratiquement absente du miel fraîchement extrait et se forme au fil du temps suite à la dégradation des sucres, notamment du fructose en milieu acide. Cet indice permet d'évaluer la fraîcheur du miel car la concentration augmente pendant le stockage, mais le processus se produit beaucoup plus rapidement si le miel est soumis à un traitement thermique. La limite maximale fixée par la législation est de 40 mg/kg, mais le miel frais doit contenir moins de 10 mg/kg.²²⁵ Une autre protéine, l'enzyme diastase, présente dans le miel (sa fonction est d'hydrolyser les sucres), est dégradée par l'exposition à la chaleur. Par conséquent, la présence de cette protéine peut également donner des informations sur la fraîcheur et le traitement thermique du miel.

Enfin, il faut remarquer que l'on peut également trouver dans le miel des micro-organismes tels que des levures (1 à 100.000 cellules par gramme).³⁵

Le miel peut être conservé pendant plus de 18 mois, et pour cette raison également, la législation nationale permet d'indiquer la date à laquelle il est conseillé de le consommer avec le mois et l'année (la législation italienne prévoit une période de conservation minimale de 24 mois).²²⁶

Une colonie d'abeilles comptant jusqu'à 40.000 abeilles au meilleur moment de l'année abritera plus de 150.000 insectes. Pour survivre l'année suivante, cette colonie aura besoin d'au moins 20 kg de pollen et 60 kg de miel. Si l'on considère que le nectar a en moyenne une concentration en sucre au plus égale à la moitié de celle du miel, cela signifie qu'il faut collecter et stocker au moins 120 kg de nectar pour constituer les stocks nécessaires, mais il est plus réaliste d'envisager une quantité plus importante.

Le nectar produit par les fleurs est aspiré dans le jabot des abeilles butineuses, c'est-à-dire une expansion de l'œsophage d'une capacité de 50-60 mL (environ 40-70 mg de nectar). L'eau est également transportée dans cette sorte de sac (le jabot). Le sac à miel peut être considéré comme une sorte d'estomac social où les abeilles stockent le nectar pour leurs sœurs. Une abeille doit visiter entre 100 et 1.500 fleurs pour remplir le jabot.⁹⁷² Une fleur de pommier peut produire 2 mg de nectar et une fleur de cerisier jusqu'à 40 mg. Ce sont les quantités totales produites pendant la floraison. En général, l'abeille butineuse ne trouve que quelques milligrammes ou dixièmes de milligrammes de nectar dans une fleur. Ainsi, si une abeille

effectue entre 3 et 10 vols par jour et visite un total de 3.000 fleurs en une journée, elle ne peut apporter à la colonie que quelques centaines de milligrammes de nectar, dont moins de 50% sont des sucres. Les abeilles doivent avoir visité entre 20 et 30 millions de fleurs pour obtenir un demi-kilo de miel. Une abeille ouvrière butineuse a besoin d'au moins 11 mg de sucre par jour, ce qui correspond à environ 22 mg de miel par jour (à 50% de sucre). Une colonie dont la population maximale est de 50.000 abeilles peut consommer plus de 120 kg de miel en un an, uniquement pour la survie des abeilles adultes. Globalement, comme mentionné ci-dessus, la colonie entière peut consommer plus de 200 kg de nectar et entre 10 et 30 kg de pollen par an.

Lorsque l'abeille retourne à la ruche, elle régurgite le nectar récolté par les autres abeilles (trophallaxie). On peut estimer que 25.000 trajets sont nécessaires pour transporter un litre de nectar.³⁵ Le nectar est composé d'eau (40-80%), de sucres (20-60%, tels que le saccharose, le glucose et le fructose) et, dans une moindre mesure, d'autres substances telles que des composés azotés, des vitamines, des pigments, des huiles essentielles et des sels minéraux. Les plantes peuvent sécréter du nectar toute la journée ou seulement à certains moments. Lorsqu'une fleur est visitée, l'abeille peut libérer une substance répulsive que les autres abeilles peuvent sentir en vol. Outre le nectar, les abeilles recueillent également d'autres solutions sucrées sur des fruits tels que le raisin ou d'autres fruits mûrs.

Au sein de la ruche, la trophallaxie a lieu, c'est-à-dire le partage et l'échange de nourriture entre insectes ; le nectar est échangé et enrichi d'une enzyme (*invertase*) produite par les glandes salivaires pour décomposer les sucres : le saccharose est décomposé en glucose et fructose. Le tube digestif de l'abeille enrichit le nectar en enzymes pendant le vol, immédiatement après la succion, comme l'amylase et la glucose oxydase (cette dernière produit du peroxyde d'hydrogène à partir de l'oxydation du glucose). Le miel provient donc du nectar qui a été échangé, digéré et dont l'eau a été éliminée par la ventilation produite par le mouvement des ailes. En utilisant des isotopes radioactifs du sucre, il a été possible de détecter que dans les 24 heures suivant l'ingestion par les abeilles butineuses, 55% des abeilles de la colonie étaient devenues radioactives en raison de la trophallaxie.⁹⁷⁴ Ainsi, si le nectar est contaminé par des polluants, ceux-ci sont très rapidement distribués dans la ruche.⁸⁶⁵

Le miel est utilisé par les abeilles comme nourriture, surtout en hiver, et pour produire de la cire grâce à des glandes situées dans l'abdomen. Les abeilles sont capables de maintenir la température de la ruche constante à environ 35°C, même en hiver, en consommant beaucoup d'énergie, à savoir le miel stocké. Pendant l'hiver, une fraction des abeilles font bouger leurs muscles de vol sans bouger leurs ailes pour produire de la chaleur. Consommant environ 20 kg de miel récolté principalement en 60 jours, les abeilles survivent à l'hiver sans hiberner. La réserve de miel typique d'une ruche en été est de 15 kg, mais en un an, les abeilles peuvent produire jusqu'à 80 kg et consommer 60 kg.¹³ L'apiculteur retire le miel de la colonie, il devra donc lui fournir une alimentation de remplacement : eau et aliments sucrés.

On estime que les abeilles consomment entre 6 et 10 kg de miel pour produire 1 kg de cire. Il est donc facile de comprendre pourquoi les apiculteurs la recyclent : ils fournissent généralement à la colonie des rayons artificiels tout prêts.²⁵⁸ C'est pourquoi les abeilles préfèrent occuper des ruches avec des rayons prêts à l'emploi. Les cellules de cire sont de forme hexagonale et pendant l'été, sur les quelque 100.000 cellules, deux à trois cinquièmes sont occupées par le couvain, deux cinquièmes par le miel et moins d'un cinquième par le pollen.¹³ La quantité moyenne de cire contenue dans une colonie est de 1,5 kg, et peut être conservée pendant des années. Les abeilles enlèvent continuellement une partie de la cire et la reconstituent (0,15 kg par an). Les cellules de cire d'une colonie peuvent former une surface de plus de 36 m² (100.000 cellules). Les abeilles ont besoin d'au moins 7,5 kg de miel pour construire un nid contenant 100.000 cellules pesant environ 1,25 kg.³⁵

Les plus grands consommateurs de miel par habitant sont la République centrafricaine (3,5 kg par an), la Nouvelle-Zélande (2 kg par an), la Slovénie (1,6 kg par an), la Grèce (1,5 kg

par an) et la Suisse (1,4 kg par an).²²⁷ Par ailleurs, la consommation annuelle de miel par habitant est d'environ 1,5 kg pour l'Allemagne, 800 g pour l'Angleterre, 600 g pour la France et moins de 500 g pour l'Italie (en 2018).²²⁹ Le miel est également utilisé pour préparer des savons, des crèmes et d'autres produits non destinés à la consommation humaine.

LE POTENTIEL MELLIFÈRE

Le potentiel mellifère d'une espèce nectarifère est la quantité de miel que les abeilles peuvent potentiellement produire dans des conditions idéales à partir d'un hectare (10.000 m²) en fleurs. Les ruches peuvent être placées à proximité de la culture lorsque 20-25% des fleurs sont déjà ouvertes, afin d'effectuer le très utile service de pollinisation. Il est intéressant de se faire une idée de certains mellifères potentiels :³⁵

- jusqu'à 25 kg/ha pour les poiriers et les amandiers : dans le cas des amandiers, il faut au moins 2 ou 3 ruches par hectare pour assurer la pollinisation pendant la floraison ;
- entre 25 et 50 kg/ha pour le tournesol, le cerisier, le pommier et le trèfle rouge ;
- entre 50 et 100 kg/ha pour le framboisier, le bleuet et la vesce ;
- entre 100 et 200 kg/ha pour le pissenlit, la lavande, le saule, le trèfle blanc, le romarin, le framboisier, la luzerne, le sycomore, le marronnier d'Inde, la menthe sauvage et l'origan ;
- entre 200 et 500 kg/ha pour le châtaignier, le lierre, le sarrasin, la coriandre, le colza et la sauge ;
- plus de 500 kg/ha pour le robinier faux-acacia, le thym, l'érable champêtre et le tilleul.

Des tests expérimentaux ont montré que plus la distance entre la ruche et la culture à polliniser est courte, plus la production obtenue est élevée (par exemple, dans les graines de colza, de tournesol ou de sarrasin). Par exemple, des ruches placées entre 1 et 216 m d'un pommier ont enregistré la production de 29,37 kg par pommier, si la distance augmente entre 430 et 600 m la production chute à 14,94 kg. Si la distance entre le pommier et la ruche est comprise entre 1.500 m et 2.000 m, la production est réduite à 9,5 kilos par arbre, c'est-à-dire que la production est réduite de 68%.

On peut estimer que chaque abeille pèse environ 0,06 g (entre 60 et 110 mg ; *Apis mellifera*).⁷⁵ Les abeilles butineuses entrent en contact avec 1 g de pollen par jour et en mangent 1,1 mg par jour ; elles prennent également jusqu'à 80,2 mg de miel par jour. Les larves se nourrissent exclusivement de pollen pendant 10 jours, consommant environ 6,5 mg de pollen par jour et jusqu'à 9,5 mg/abeille par jour.^{32, 45} Globalement, 130 mg de pollen sont consommés pour permettre le développement jusqu'au stade d'abeille adulte : une colonie consomme 20-26 kg de pollen en un an.¹³

Chaque abeille doit visiter entre 80 et 150 fleurs pour remplir ses sacs de pollen. Les sacs sont situés dans les pattes arrière et peuvent porter un poids de 7,5 mg chacun ; on peut estimer qu'une abeille peut transporter jusqu'à 300 mg de pollen dans la ruche en faisant un maximum de 20 voyages par jour. Cette quantité dépend des fleurs, car certaines d'entre elles produisent beaucoup de pollen, si bien qu'une seule visite suffit pour compléter une charge. Au cours d'une année, on estime qu'une colonie de taille moyenne collecte entre 20 et 50 kg de pollen par an.¹⁸⁴ Chaque abeille peut visiter jusqu'à 3.000 fleurs par jour en battant des ailes à une fréquence comprise entre 200 et 300 battements par seconde. La fréquence des battements d'ailes peut être utilisée pour les distinguer des espèces similaires. Elles peuvent voler à une vitesse maximale d'environ 20-22 km/h en transportant une charge de nectar et de pollen égale à 50% de leur poids corporel qui, comme nous l'avons déjà mentionné, est compris entre 100 et 120 mg (la vitesse maximale enregistrée en vol était de 34 km/h).

Dans le règne animal, les colibris (petits oiseaux qui peuvent jouer le rôle de pollinisateurs) sont également capables d'exploits similaires : ils battent des ailes 200 fois par

seconde et peuvent prendre des centaines de respirations par minute (jusqu'à 500).⁸⁴⁸ En raison de ce métabolisme intense, les colibris doivent manger chaque jour autant de nectar (en visitant jusqu'à 1.500 fleurs par jour) et d'insectes que leur poids corporel.

En vol, les abeilles butineuses consomment environ 6,8 mg de sucre par heure et peuvent transporter 40 à 60 mg de nectar et 10 à 20 mg de pollen.¹³ Par conséquent, plus elles doivent s'éloigner de la ruche pour récolter du miel, moins le retour d'énergie peut être intéressant. On estime une consommation moyenne par abeille de 10 mg/jour de miel et de 1 mg/jour de pollen. Les apiculteurs peuvent nourrir artificiellement les abeilles avec un sirop de sucre à 50% ou à différentes concentrations. Lors de tests expérimentaux (en laboratoire), les abeilles ouvrières (*Apis mellifera* de la race Carniola) peuvent consommer 250 mm³ de solution eau-sucre (à une concentration de 2 mol/dm³) en 24 heures.⁴⁸⁵

Le pollen est la principale source de protéines et de vitamines ; les protéines sont également importantes pour le système immunitaire et prolongent l'espérance de vie des abeilles.⁷⁶⁴ Entre 6 et 28% du poids du pollen sont constitués de protéines contenant au moins 10 acides aminés essentiels pour les abeilles ; le pollen contient généralement moins de 0,2% de sucres. Outre les protéines, le pollen contient également des lipides, des stérols, des vitamines et des minéraux. Il a été démontré que les abeilles ayant une faible disponibilité de pollen ont une espérance de vie réduite (21 à 56%), ont tendance à devenir des butineuses à un âge précoce et présentent d'autres problèmes tels que des capacités de communication réduites.³⁵ La réduction actuelle de la biodiversité florale impliquant une alimentation monotone dans des monocultures génère facilement des carences nutritionnelles dans la colonie.

LES PRINCIPALES CULTURES POLLINISÉES PAR LES ABEILLES

On pense que les abeilles domestiques sont capables de polliniser au moins 4.500 espèces de fleurs. Certaines plantes ont des fleurs hermaphrodites (par exemple, les pommes et les tomates) dans lesquelles les parties mâle et femelle se trouvent dans la même fleur. D'autres plantes ont des fleurs mâles et femelles dans le même individu mais séparées (par exemple, les noisettes et les courgettes). D'autres n'ont que des fleurs femelles ou que des fleurs mâles, elles sont donc soit mâles soit femelles. Parmi les plantes présentant le plus grand intérêt commercial pour l'homme, on trouve les suivantes.^{35, 174}

	Plantes pour lesquelles le service de pollinisation est essentiel	Plantes pour lesquelles le service de pollinisation est important
Plantes fruitières	Abricotier (certains cultivars), pastèque, châtaigne, cerisier doux, amande, mangue, pommier (presque tous les cultivars), melon, noix d'Australie, poire (nombreux cultivars), pêchier (nombreux cultivars)	Abricotier, cerisier noir, cerisier acide, kaki, kiwi, framboisier, myrtille, mangue, pommier, mûrier, nèfle, poirier, pêchier, prunier, fraisier, trèfle incarné.
Cultures fourragères pour les semences	Luzerne, féveroles, lotier corniculé, sainfoin, trèfle alexandrin, trèfle hybride, trèfle ladino, trèfle rouge, vesce.	Sarrasin
Cultures maraîchères pour les semences	Ail, asperge, blette, brocoli, carotte, chou de Bruxelles, chou chinois, chou-fleur, chou, chou de Milan, pastèque, coriandre, melon,	Oignon, aubergine, poivron, piment, tomate, fenouil, haricot

	poireau, persil, radis, céleri, moutarde, citrouille	
Cultures horticoles	Concombre, pastèque, melon, potiron, courgette	Navets, fenouil
Plantes oléagineuses	--	Colza, carthame, navette

Les autres plantes qui peuvent être pollinisées par les abeilles, bien que ce service ne soit pas indispensable, sont le soja, le tournesol, le cactus, la grenade, la groseille, les agrumes, le trèfle et l'églantier. Parmi les plantes qui peuvent être visitées par les abeilles mais qui produisent également des fruits en l'absence de cet insecte figurent la vigne, le fraisier et la papaye. La vigne produit des fleurs qui sont pollinisées principalement par le vent, mais les abeilles peuvent tout de même récolter du pollen ou visiter le vignoble pour recueillir le jus de sucre des fruits endommagés. Les abeilles contribuent à produire 30% des graines de colza destinées à la production d'huile et 95% des graines des plantes destinées à d'autres cultures (semences).²⁴³

Parmi les arbres intéressants pour l'apiculture en milieu urbain figurent l'érable, le laurier, l'hibiscus, le marronnier d'Inde, le cytise et le magnolia. Les arbustes comprennent le houx, le lierre, la lavande, l'aubépine, la vigne américaine, le lilas et la pivoine.

L'importance du service de pollinisation fourni par les abeilles varie considérablement d'une plante à l'autre et dans différents contextes. Un exemple est la luzerne (*Medicago sativa*), une plante légumineuse vivace avec des feuilles trifoliées, des fleurs avec des corolles violettes, bleutées ou jaunes en racèmes et des légumineuses formant une spirale. C'est une culture fourragère très importante en Italie, mais aussi dans d'autres pays comme les États-Unis. La luzerne ne représente une source nectarifère importante qu'en l'absence de flore compétitive. Cela est dû au mécanisme qui se produit dans la fleur pour favoriser la dispersion du pollen : lorsque l'abeille se pose sur la fleur, le tube de la tige se redresse, heurtant l'insecte et le piégeant contre le pétale supérieur. C'est pourquoi les abeilles quittent la luzerne dès que des fleurs alternatives apparaissent. La production de miel à partir de la luzerne n'est possible que si la plante est laissée en pleine floraison pour la production de graines et n'est donc pas fauchée pour le fourrage.

Sans le service rendu par les abeilles, probablement 23% des fruits, 16% des légumes et 22% des noix et des graines du monde seraient perdus ou produits en bien moindre quantité.¹⁹⁶ Grâce à la pollinisation par les abeilles, de nombreuses plantes produisent des fruits plus gros et de meilleure qualité (par exemple, des pastèques plus sucrées) et leur nombre de graines et leur taux de germination augmentent (par exemple, le colza, le tournesol, le sarrasin, le trèfle rouge). Afin de compenser le manque de pollinisateurs et d'accroître l'indépendance à leur égard, les chercheurs sélectionnent de nouvelles variétés de plantes qui ont moins ou pas besoin de pollinisateurs. On peut citer l'exemple du colza et du kiwi. Un mécanisme qui a survécu à la sélection naturelle pendant des millions d'années est remplacé par d'autres, dépendant de l'ingéniosité humaine, qui ne sont ni durables ni soutenables. Un autre effet secondaire de la sélection artificielle des plantes est qu'elle ne tient pas compte de la production de nectar et de pollen. C'est, par exemple, le cas lorsque des tournesols sont sélectionnés afin d'obtenir des plantes ayant un meilleur rendement en huile, une plus grande force de tige ou d'autres caractéristiques qui ne tiennent pas compte des pollinisateurs. Il en résulte des plantes moins utiles aux insectes et moins attrayantes.

En Italie, en 2017, en moyenne, chaque apiculteur (sur les 48.889 inscrits au registre national des abeilles) possédait 28 ruches et chaque rucher était composé en moyenne de 14 ruches. Il est donc possible de trouver des dizaines de ruches situées à proximité les unes des autres. Le nombre indicatif de ruches nécessaires pour assurer une bonne production par hectare dans les différentes cultures est donné ci-dessous.

Catégorie	Culture	Nombre de ruches par hectare (selon le cultivar) ³⁵
Portant intérêt	Abricotier	5-8
	Cerisier	4-10
	Kiwi	8-10
	Pommier	6-8
	Poirier	6-10
	Prunier	7-10
Petits fruits	Fraisier (plein champ), framboisier, myrtille	2-4
Semenziere	Luzerne	6-8
	Trèfle rouge	4-6
	Autres légumineuses (féveroles, vesce sainfoin)	2-4
	Cucurbitacées (melon, pastèque, courgette)	4-6
	Légumes crucifères (choux, radis, roquette)	3-4
	Composés (chicorée, endive)	3-4
	Tournesol	8-10

CERTAINS TYPES DE FRAUDE CONCERNANT LE MIEL

Certains types de fraude auxquels les apiculteurs peuvent se livrer sont résumés ci-dessous :⁸⁵⁰

- L'indication d'une origine florale et/ou géographique différente (par exemple, du miel chinois passé pour du miel européen).⁹⁸⁷ Cette fraude peut s'accompagner de l'ajout de pollen au miel.

- La dilution du miel avec des sirops de sucre, par exemple de maïs, de canne à sucre, de betterave à sucre, de riz ou de blé.

- Déshydratation artificielle (par exemple sous vide) du miel récolté lorsqu'il était encore immature (les abeilles transforment le nectar en miel par diverses modifications, dont celle qui réduit la teneur en eau).

- L'élimination du pollen pour réduire la possibilité de retracer l'origine.

- La purification des ions (par échange d'ions) dans le miel dans le but de l'éclaircir ou de changer sa couleur.

- Alimentation artificielle des abeilles avec des aliments et des médicaments.

Selon certaines enquêtes, le miel est le troisième produit alimentaire le plus frelaté aux États-Unis (2018), après le lait et l'huile d'olive.⁸⁵⁰ Pour tester l'authenticité du miel et en particulier son origine florale, on utilise le test du pollen. Pour éviter ce type de contrôle, on peut retirer le pollen du miel et en ajouter.

Une autre possibilité de traçabilité de l'origine est celle offerte par l'examen du profil d'autres substances contenues dans le miel, en utilisant des techniques analytiques coûteuses telles que la chromatographie liquide.⁸⁵⁶ Avec des investigations analytiques appropriées, il est possible d'examiner les concentrations de molécules telles que les flavonoïdes, qui peuvent permettre de discriminer les miels d'origine florale différente et donc d'origine géographique différente.

SYMBIOSE ENTRE LES HYMÉNOPTÈRES ET LES FIGUIERS

Certaines plantes ont besoin d'insectes pollinisateurs autres que les abeilles, comme le cacaoyer, le vanillier et le figuier. Les abeilles ont des langues d'environ six millimètres de long, de sorte que les fleurs dont le nectar est contenu dans des secteurs plus profonds ne peuvent être utilisées pour la récolte. Dans certains cas, la symbiose entre les plantes et les insectes est indispensable, de sorte que seule une ou quelques espèces peuvent polliniser une fleur particulière, comme dans le cas du figuier. Au moins soixante-cinq espèces de figuiers (*Ficus*) ont été recensées. Ce groupe de plantes, depuis 65 millions d'années, a eu le temps d'établir une relation étroite et indispensable avec les guêpes qui les pollinisent.⁷⁰⁴ Chaque espèce de figue dépend d'une espèce de pollinisateur. Cette co-évolution a conduit les plantes à figes à produire des fleurs neutres, c'est-à-dire incapables de produire des graines et servant de gîte larvaire aux pollinisateurs. Si les guêpes pondent leurs œufs dans une fleur femelle, l'œuf de l'insecte ne se développe pas et la graine n'est pas affectée. C'est donc le figuier qui exerce un contrôle sur les ressources de pollinisation en déterminant le nombre de fleurs neutres. Les différentes espèces de figuiers peuvent donc produire trois types de fleurs : mâles, femelles et neutres. Selon l'espèce de figuier, un arbre peut produire un réceptacle contenant trois types de fleurs en même temps, deux types de réceptacles ou parties apicales de la fleur (l'un contiendra les fleurs neutres et les fleurs mâles) ou trois ou quatre types de réceptacles dans lesquels on peut observer diverses combinaisons de fleurs sexuées et neutres. La partie la plus curieuse de cette invention extravagante de la nature est que les mâles naissent de l'œuf à l'intérieur de la fleur et sans ailes, et qu'ils s'accouplent et meurent à l'intérieur du figuier. Les femelles, quant à elles, sortent du réceptacle par un minuscule pore, recueillant le pollen au passage. Lorsque les femelles s'envolent à la recherche de nouvelles fleurs pour y pondre leurs œufs, elles pollinisent les fleurs femelles à l'intérieur. Lorsque la plante se débarrasse des réceptacles qui n'ont pas été pollinisés, toute guêpe femelle qui n'a pas rendu l'hospitalité de la pollinisation perd sa progéniture. Ces guêpes (hyménoptères) vivent deux à trois jours, mesurent quelques millimètres de long et peuvent se déplacer jusqu'à dix kilomètres. Les populations sauvages de la figue comestible commune (*Ficus carica*) originaire de la région méditerranéenne produisent en fin de saison des réceptacles qui ne contiennent que des fleurs neutres. Pendant l'hiver, les guêpes des figes sont nourries à l'intérieur des réceptacles et sont ensuite libérées pour les polliniser en visitant les réceptacles produits au printemps. Les variétés domestiquées produisent des fruits très sucrés sans fertilisation.

LE MIEL DE MIELLATS

Le miellat est une sécrétion sucrée émise par les insectes phytophages (Rhinoptera Homoptera) tels que les pucerons et les coquilles qui se nourrissent de la sève des plantes. La sève des plantes est riche en sucres mais pauvre en acides aminés. C'est pourquoi certains insectes se nourrissant de sève doivent ingérer une grande quantité de sève afin d'obtenir la bonne quantité d'acides aminés. Certains insectes filtrent donc la sève, expulsant les sucres et conservant les protéines. Ce liquide, sécrété par certains insectes comme les pucerons, est une sève privée d'acides aminés et il est appelé miellat. Si le miellat reste sur les feuilles des plantes, il favorise le développement de certains champignons saprophytes (moisissures) qui s'en nourrissent et forment une couche noirâtre, appelée fumagine, car elle ressemble à un dépôt de suie mais est constituée d'hyphes. La moisissure entrave la photosynthèse chlorophyllienne, son élimination par les fourmis ou les abeilles est donc une bonne chose pour les plantes.

Le miellat n'est rien d'autre qu'un type d'excréments d'animaux tels que les pucerons. Le miellat est composé de fructose, glucose, saccharose, fructo-maltose, melicitose (ces deux

derniers sont des trisaccharides typiques du miellat et du miel qui en résulte), d'enzymes, de sels minéraux et d'acides organiques.³⁵ Le miellat peut être produit par des insectes présents dans toutes les plantes, y compris les sapins, les mélèzes, les chênes, les tilleuls et les plantes herbacées. Il constitue un substrat alimentaire essentiel pour un grand nombre d'insectes et certains champignons saprophytes et, dans certaines populations, pour l'homme lui-même. Il est produit dans les bois principalement par les parasites des conifères et est utilisé par les abeilles pour produire du miel sans pollen.

La collecte de miellat par les humains est décrite dans l'Ancien Testament et est bien connue par les Aborigènes australiens.⁷¹⁰ Le miel de miellat est issu d'excréments d'insectes recueillis et traités par d'autres insectes : les abeilles. Des symbioses intéressantes se sont développées entre les fourmis qui se reproduisent et protègent les pucerons et profitent également à d'autres animaux comme les abeilles. Les fourmis défendent les pucerons contre l'attaque des guêpes, des mouches et d'autres parasites qui pourraient injecter leurs œufs dans le corps ou les manger. Le miellat est donc collecté et accumulé par les fourmis, les abeilles, d'autres insectes et les humains.

En plus de défendre les insectes producteurs de miellat, les fourmis les déplacent vers les meilleures pousses de la bonne plante et, dans certains cas, élèvent leurs œufs dans les fourmilières et les emmènent avec elles lorsqu'elles migrent. Ainsi, la symbiose peut avoir des mécanismes très élaborés et protecteurs, faisant des fourmis de véritables reproductrices de miellat. Des symbioses similaires ont également été enregistrées entre les fourmis et les chenilles de papillons, qui produisent également une sécrétion nutritive pour les fourmis (elles peuvent disposer d'une glande spéciale). Certains papillons ont besoin de l'aide des fourmis pour survivre et vice versa. Les papillons adultes peuvent se nourrir de miellat et sont donc également apparentés aux insectes phytophages ; les chenilles sont également connues pour se nourrir de fourmis et de pucerons.

Les interactions qui peuvent être enregistrées dans la nature sont étonnantes et incroyablement complexes. Les équilibres sont délicats et dépendent de multiples facteurs, dont nous ignorons la plupart, mais que nous détruisons chaque fois que nous simplifions et intervenons dans un écosystème (par exemple, en labourant, en utilisant des herbicides et des insecticides). Le nomadisme de milliers de colonies d'abeilles perturbe également l'équilibre naturel. Pensons au miellat qui, avec l'arrivée des abeilles voyageant par la route, est soudainement concurrencé par les fourmis, les papillons et les millions d'abeilles soignées par les humains et déconnectées de ces équilibres naturels. Cela ne peut se produire dans les monocultures industrielles où les délicats équilibres trophiques ont été détruits depuis longtemps.

Les ruches placées à proximité de forêts productrices de miellat peuvent souffrir d'un manque de pollen, ce qui entraîne une réduction du nombre de juvéniles dans la colonie : à la fin de l'été, il n'y aura presque plus que des abeilles adultes. Cette condition négative non naturelle est favorisée par la présence de forêts artificielles composées de quelques espèces, mais elle est compensée par le nomadisme et l'utilisation d'aliments de remplacement du pollen.

LA CIRE D'ABEILLE DANS LES SECTEURS ALIMENTAIRE ET PHARMACEUTIQUE

La cire est produite par quatre paires de glandes abdominales chez les abeilles ouvrières à l'âge de deux à trois semaines (les glandes dégèrent chez les butineuses) et est composée à 80% d'hydrocarbures et de lipides (la cire est constituée de plus de 300 molécules différentes, dont des esters et des alcools d'acides gras, des paraffines et des acides gras libres). Une colonie de 50.000 abeilles peut produire 200 à 300 g de cire en une journée (on estime que la colonie produit jusqu'à 1 kg de cire pour 40 à 50 kg de miel).⁹⁷⁴

La cire d'abeille est un produit d'élevage polyvalent utilisé dans la fabrication d'une variété de produits d'usage courant. En plus d'être recyclée par les apiculteurs, la cire d'abeille est utilisée dans plusieurs catégories de produits : ^{57, 974}

- les produits pharmaceutiques (pommades, enrobages de pilules) ;
- les cosmétiques (crèmes pour le visage, rouges à lèvres, savons) ; l'une des premières applications enregistrées de la cire comme cosmétique (mélangée à de l'huile d'olive, de l'eau et probablement des parfums) remonte à au moins 2000 ans ;
- les denrées alimentaires (dans les chewing-gums, comme matériau de scellement dans les emballages alimentaires, dans les glaçages et les produits de confiserie) ;
- d'autres produits tels que les agents de polissage (par exemple, les cires pour sols), les peintures (les Égyptiens, entre 60 et 230 après J.-C., utilisaient certainement la cire pour produire une sorte de vernis), les bougies, etc.

La cire qui a des applications dans le secteur alimentaire est désignée E901 (*additif alimentaire*) et est utilisée comme agent d'enrobage dans les biscuits contenant de la crème glacée, comme agent de glaçage dans les produits en chocolat ou en cacao (cette plante dépend également de la pollinisation entomophile), dans les bonbons et les chewing-gums, les confiseries à base de farine, pour le traitement de surface des fruits tels que les agrumes, les poires, les pommes, les pêches, les mangues et les avocats.

La cire d'abeille est la meilleure matrice parmi les produits apicoles pour obtenir des informations sur les traitements effectués sur le terrain et par les apiculteurs, même des mois à l'avance. La mesure des pesticides dans la cire d'abeille fournit des informations sur les traitements illégaux effectués par les apiculteurs et les agriculteurs. ⁵⁵ Le pollen est la meilleure matrice pour obtenir des informations sur les traitements effectués par les agriculteurs.

La cire peut rester dans la ruche pendant plusieurs années et c'est pourquoi elle est souvent la matrice la plus contaminée de la ruche. ⁵⁴ La cire est recyclée par les apiculteurs et peut malheureusement facilement accumuler des substances volatiles, liposolubles et persistantes. Les molécules persistantes et résistantes à la chaleur que l'on peut trouver dans la cire (par exemple, les pesticides lipophiles) représentent un risque considérable. Par rapport au miel, aux abeilles vivantes et au pollen, la cire enregistre les plus fortes concentrations d'acaricides utilisés par les apiculteurs tels que le coumaphos, le chlorfenvinphos, le fluvalinate et l'acrinathrine, retrouvés dans 75% des 133 échantillons. ⁵⁵ Il n'existe pas de surveillance officielle des risques générés par l'ingestion ou l'utilisation cosmétique de cire contaminée par des pesticides ou d'autres molécules (par exemple, le pollen pour les personnes allergiques). En Europe, il n'existe pas de normes de qualité pour le produit de la cire d'abeille, bien que certains pays aient des règles internes.

En ce qui concerne le secteur alimentaire, la cire d'abeille est identifiée par l'acronyme E901 (*additif alimentaire à base de gomme-laque et de cire d'abeille, sécrétion naturelle purifiée, formulée avec des émulsifiants et des agents solubles*) et est autorisée en tant qu'additif alimentaire, avec de multiples objectifs technologiques, notamment dans l'industrie de la confiserie et des produits de boulangerie. Cependant, la cire d'abeille n'est pas considérée comme faisant partie de la catégorie des *aliments* et n'est donc soumise à aucun type de contrôle de qualité (règlement CE 178/2002). Il en va de même pour les applications non alimentaires telles que la cosmétique ou la pharmacologie : bien qu'il s'agisse d'un élément fondamental dans la production de savons, de crèmes, de pommades et d'autres produits cosmétiques, notamment dans les catégories de produits biologiques et naturels, aucun critère de qualité homogène n'a été établi pour la cire d'abeille en fonction du secteur commercial dans lequel elle est utilisée. ⁷⁰ En Italie, un règlement technique (n°16 de Sincert, mise à jour 05/11/2018) fournit des lignes directrices pour le contrôle de la cire brute. ⁷⁷ Toutefois, des limites maximales résiduelles (LMR) ne sont établies que pour cinq acaricides utilisés en apiculture et ne s'appliquent qu'à la cire destinée à la production de feuilles de cire utilisées dans les ruchers biologiques.

LA PROPOLIS

La propolis est une substance résineuse et brune produite par les bourgeons des arbres (résine, gomme, exsudat) que les abeilles transforment et utilisent pour boucher les trous et les crevasses de la ruche et pour résister aux attaques des bactéries et des champignons. La propolis est recueillie par les abeilles sur les bourgeons et l'écorce de diverses plantes telles que le peuplier, le bouleau, l'aulne, l'épicéa, le sapin, le pin, le prunier, le cerisier, l'orme, le chêne, le marronnier d'Inde et le frêne. La propolis est fabriquée à partir de sécrétions végétales auxquelles sont ajoutées des sécrétions salivaires et enzymatiques par les abeilles (70% de résine, 25% de cire et 5% d'huiles volatiles).¹³ Plus de 200 substances différentes ont été identifiées dans la propolis. Sa composition varie selon l'origine géographique et dépend donc de l'espèce végétale dont elle est extraite. La propolis peut contenir 5% de pollen et est obtenue à partir de résine végétale mélangée à des sécrétions salivaires et à de la cire produite par les glandes abdominales des abeilles (elle peut contenir des stérols, des huiles essentielles, des terpènes, des acides aminés, des flavonoïdes, des acides phénoliques, des esters aromatiques, des phénols alcooliques, des cétophénols, des coumarines, des lipides, des polysaccharides, des cires, des vitamines et des protéines).⁶² Selon de nombreux auteurs, la propolis est la matrice des abeilles qui présente la plus forte concentration de métaux.⁷⁴

La résine nécessaire est recueillie dans des sacs dans lesquels se trouve également le pollen. La propolis était utilisée par les prêtres de l'Égypte ancienne pour la momification et, au XVIII^e siècle, pour fabriquer un vernis adapté au bois, et était utilisée par les luthiers de Crémone, en Italie. Les Grecs l'utilisaient pour accélérer la cicatrisation des plaies. Aujourd'hui, la propolis est utilisée dans des préparations pharmaceutiques et cosmétiques, principalement comme composant de crèmes, mais dans de faibles proportions car elle peut provoquer une sensibilisation (dermatite à la propolis).¹ Une mâchoire humaine de 6500 ans découverte en Istrie présente une cavité remplie de cire et de propolis.⁹⁷² La propolis est recueillie en grattant la ruche où elle a été déposée et on peut en récolter quelques dizaines de grammes par ruche (23-88 g).³⁵

LE COMPORTEMENT DES ABEILLES

Les abeilles sont des insectes fascinants en raison de leur comportement social, qui est généré par un cerveau composé de moins d'un million de cellules nerveuses (elles tiennent dans une tête d'épingle).²⁵⁴ À titre de comparaison, le cerveau humain contient environ 90 à 100 milliards de neurones et au moins 10 fois plus de cellules de soutien (appelées cellules gliales). Par rapport aux abeilles, une mouche à fruits (*Drosophila melanogaster*) en a cinq fois moins et une seiche 40 fois plus. Les stimuli nerveux cessent de fonctionner lorsque la température descend en dessous de 5°C et, en laboratoire, la mémoire à court terme peut être contrariée par le froid. L'un des aspects intéressants des abeilles est leur vue, assurée par quelque sept mille yeux ponctuels (ommatidies) qui peuvent également voir les ultraviolets et la lumière polarisée. Les abeilles sont capables de percevoir des signaux tactiles, olfactifs et visuels, mais elles ont également un goût et perçoivent les champs électrostatiques grâce à un système nerveux de très petite taille. Elles sont également capables de comportements étonnants. Les abeilles peuvent mémoriser et se souvenir du moment où la nourriture est disponible. Dans des conditions expérimentales, les abeilles récompensées à un moment donné sur un nourrisseur et à un autre moment sur un autre, apprennent à voler au bon moment et au bon endroit.²⁵⁴

Au moins 24 types de virus ont été identifiés chez les abeilles domestiques, qui peuvent différer par le type d'impact qu'ils génèrent.²³⁰ La principale cause de propagation du virus est l'acarien

(*Varroa*).¹³ Cet acarien peut être considéré comme un vampire de l'abeille. L'enlèvement volontaire d'abeilles malades sans retour (suicide altruiste ou immunité sociale) a également été enregistré.

Les abeilles peuvent se défendre contre leurs ennemis en mordant, mais dans le cas de petits parasites comme les acariens ou les teignes de la cire, ce système est inutile. Parmi les comportements de défense sociale contre les acariens établis sur le corps des abeilles, il a été observé qu'elles peuvent mordre le parasite avec leurs mandibules. On a identifié au moins deux gènes qui confèrent aux abeilles une capacité naturelle à se défendre contre le *Varroa*.⁹⁷⁴

L'odorat des abeilles est étonnant dans la mesure où elles peuvent distinguer des substances qui ne diffèrent que par un seul atome de carbone (alcools différents). Les récepteurs d'odeurs situés sur les antennes leur permettent de percevoir les odeurs dans l'espace (avec le trille des antennes ; plus de 170 gènes pour les récepteurs d'odeurs ont été identifiés).⁹⁷⁴ L'abeille utilise cette capacité pour s'orienter lors de la recherche de fleurs et à l'intérieur de la ruche (elle est capable de percevoir des stimuli olfactifs émis à une distance de six millisecondes, et grâce à cette vitesse, elle peut discriminer la présence d'odeurs provenant de sources situées dans des positions différentes). En examinant l'odeur, les abeilles peuvent percevoir si celles qui se trouvent devant elles descendent de la même reine ou du même père, car la reine des abeilles s'accouple avec plusieurs mâles. Quand les abeilles sont endormies, elles ont leurs antennes baissées.

En ce qui concerne le goût, des récepteurs sont présents sur la langue et sur tout le corps (par exemple, sur les poils).

Pour leurs capacités de communication, elles sont capables de communiquer la position des fleurs, de l'eau et de la résine dans l'obscurité de la ruche en utilisant des danses, des vibrations et des champs électrostatiques. Une colonie d'abeilles forme ce que l'on peut appeler un super-organisme car il existe une organisation sociale complexe. Les abeilles remplissent différentes fonctions en fonction de leur sexe et de leur âge et sont capables de s'orienter et de communiquer des informations de manière assez sophistiquée. Elles utilisent principalement des signaux chimiques pour communiquer, mais peuvent également utiliser des vibrations, des sons et des mouvements.²³¹ Les abeilles sont capables de déterminer la qualité du nectar (par exemple, la concentration en sucre) et de communiquer l'emplacement de la source de nourriture grâce à deux types de danse. Lorsque le site se trouve à moins de 50-100 m de la colonie, les abeilles exécutent une danse circulaire en alternant les virages à gauche et à droite. La danse circulaire consiste à décrire des cercles serrés en changeant constamment de direction. La danse se déroule dans l'obscurité sur les rayons à l'intérieur de la ruche. Les abeilles qui ont suivi la danse partent à la recherche de leur butin et répètent la danse à leur retour. Par conséquent, si les fleurs sont riches en nectar et en pollen, le nombre d'abeilles enrôlées dans la recherche augmente rapidement.

Une autre danse est celle de l'abdomen, exécutée pour communiquer des lieux intéressants plus éloignés comme les sources de nourriture ou le lieu de construction d'une nouvelle maison (jusqu'à 10 km de distance).²⁵⁴ Dans ce cas, l'abeille qui revient effectue un mouvement en forme du chiffre huit. Pendant la ligne droite, elle fait vibrer son abdomen avec un mouvement de balancier (12-15 vibrations par seconde). Elle effectue des cercles dans lesquels plus le mouvement de l'abdomen, c'est-à-dire la ligne droite, est long, plus la distance à la source de pollen ou de nectar est grande. Un bourdonnement est également produit pendant la danse. La course en ligne droite peut être considérée comme une version ritualisée du vol que les autres ouvrières devront effectuer pour se rendre de la ruche à la cible. L'angle par rapport au Soleil de l'étirement rectiligne permet de communiquer la direction ; les abeilles perçoivent la position du Soleil même en présence de nuages, grâce à la lumière polarisée qui filtre. La durée de la marche frétilante (effectuée dans l'obscurité et dans des peignes perpendiculaires) est proportionnelle à la durée du vol à l'extérieur. Une durée d'une seconde du mouvement oscillant

de l'abdomen combiné au bourdonnement représente une moyenne de mille mètres de vol.²⁵⁸ L'angle fait par la marche par rapport à la ligne verticale du nid d'abeille représente l'angle du voyage aller par rapport à la direction du Soleil. Ainsi, si une butineuse danse tout droit vers le haut, cela indique que les fleurs sont dans la même direction que le soleil. Alors que si la marche est inclinée de 50 degrés vers la gauche, cela signifie qu'elle vole dans la direction située à 50 degrés à gauche de la verticale. Une abeille communiquant la présence d'un site rempli de fleurs riches en butin effectuera une danse composée de plus de 100 tours accomplis en plus de 200 secondes, tandis qu'une autre abeille communiquant la présence d'un site moins intéressant pourra effectuer seulement 15 tours en 30 secondes. Il existe donc une relation entre l'intensité et la durée de la danse et la richesse du site. Plus le site est attrayant, plus le retour de la danse du droit est court. Cela rendra la danse plus vivace.

Les abeilles produisent également différents types de bourdonnements (180-800 Hz) qui communiquent différents messages et qui peuvent être mesurés et utilisés pour prédire des comportements tels que l'essaimage imminent ou la mort de la reine des abeilles. Des systèmes d'enregistrement vidéo et audio peuvent être utilisés pour surveiller et analyser ces comportements. Une application barbare consiste à couper les ailes de la reine des abeilles pour empêcher l'essaimage.⁷⁶⁴

Le comportement cannibale est connu chez les abeilles, par exemple chez les larves.¹³ Ce comportement peut être une réponse à la pénurie de pollen. Les abeilles élevées dans la pénurie de pollen ont tendance à devenir des butineuses à un âge précoce, peuvent facilement mourir le premier jour de leur vol et dansent rarement si elles reviennent à la ruche.³⁵

Une colonie qui a perdu sa reine est reconnue par les colonies voisines et peut être pillée. En présence de la reine des abeilles, une ouvrière sur 10.000 peut avoir des ovaires fonctionnels et commencer à pondre des œufs, qui sont ensuite reconnus et éliminés. La reine marque ses œufs avec une phéromone, de sorte que les autres œufs pondus par les ouvrières sont facilement reconnus par ces dernières et détruits. En outre, les abeilles ouvrières reconnaissent celles qui ont commencé à pondre des œufs et les détruisent.

L'un des comportements intéressants des abeilles est l'essaimage, c'est-à-dire le phénomène au cours duquel une partie des abeilles ouvrières reste dans la ruche et élève une nouvelle reine, tandis que les autres (au moins 10.000 abeilles) s'envolent avec l'ancienne reine pour créer une nouvelle colonie (au cours de l'essaimage, entre 30 et 70% des abeilles quittent la ruche avec l'ancienne reine). Avant l'essaimage, qui a lieu entre avril et juillet, les abeilles élèvent dix reines ou plus, qui sont toutes des filles de la reine mère (dans le Piémont, l'essaimage a lieu généralement entre avril et mai). Les abeilles essaimeuses se rassemblent d'abord en une grappe à moins de trente mètres de la ruche, où elles resteront quelques jours tout au plus. De cet essaim accroché à une branche, plusieurs centaines d'abeilles vont partir à la recherche d'un nouveau foyer, explorant jusqu'à 70 km². Les explorateurs, abeilles ouvrières plus âgées, identifieront au moins dix sites différents choisis selon certains critères. Au terme d'un processus démocratique, la colonie ne devra en choisir qu'un seul. Le mécanisme fascinant de ce processus est la sélection démocratique du meilleur site pour tous. Une évaluation collective des propriétés du site (par exemple, une cavité arboricole) est réalisée, pour ainsi dire, et le site doit présenter les caractéristiques minimales pour convaincre la majorité de la colonie. Grâce à la manifestation de l'intelligence collective, un choix crucial doit être fait par environ un kilo et demi d'abeilles. L'essaim n'a que quelques jours pour faire son choix et occuper un nouveau nid. Leur temps est régi par les stocks de miel qu'elles ont pris dans l'ancien foyer avant de partir (environ 50% du poids corporel des abeilles en essaim est constitué de miel ingéré). Le mécanisme de prise de décision compare les différentes options présentées par différentes abeilles ouvrières éclairées. Chacune essaie de convaincre les autres abeilles et l'option qui passe en premier un seuil de consensus sera choisie. Les abeilles engagées dans l'exploration et la danse peuvent représenter entre 2,8% et 5,4% du nombre total, c'est-à-dire entre 300 et 500 si

l'essaim est composé de 10.000 insectes ; c'est le nombre d'abeilles qui favorisent activement le débat.²⁵⁸ En quelques heures ou quelques jours, une décision de groupe est prise dont dépend la survie de tous. Au départ, chaque abeille exploratrice exécute la danse en pointant dans la direction du nid potentiel découvert. Cependant, si l'on observe toutes les abeilles qui dansent (ou la plupart d'entre elles) juste avant l'essaimage, on remarque qu'elles pointent dans la même direction. Des observations intéressantes ont révélé que le nombre d'abeilles qui doit être en faveur du site est d'au moins 75 abeilles ouvrières. C'est-à-dire qu'il suffit qu'au moins 75 aient visité le site et l'aient jugé convenable en le promouvant avec la danse pour que l'essaim se déplace dans cette direction (plus ou moins 1% de l'essaim). C'est une sorte de *quorum*¹. Avant le départ, les abeilles échauffent leurs muscles pour le vol et émettent un bruit caractéristique. Le choix du meilleur site a été fait et elles se préparent pour le vol collectif qui les emmènera vers un nouveau foyer. Dans cette dimension, les abeilles peuvent être considérées comme une seule intelligence collective pesant quelques kilos seulement. Une leçon possible de ce comportement est que la promotion d'une concurrence ouverte et équitable entre les différentes factions peut être une bonne solution au problème de devoir choisir parmi un ensemble dispersé d'informations disponibles parmi un groupe d'individus. Les danseuses convainquent d'autres butineuses d'aller visiter le site, et à leur retour, si elles ont évalué positivement le nouveau site, elles danseront pour promouvoir la même proposition. La vivacité de la danse sera proportionnelle à la qualité du site. Au fil du temps, le nombre d'exploratrices dansant pour promouvoir un site augmente, car de nouvelles exploratrices sont recrutées si l'habitation probable présente les meilleures caractéristiques : volume d'environ 40 L, entrée d'environ 15 cm², exposition de l'entrée et absence de fourmis. Les sites pauvres génèrent des danses faibles et ont tendance à ne pas attirer d'abeilles pour les remplacer (les rapports sur les sites pauvres disparaissent). Au début, une ou quelques abeilles exploratrices ont découvert un nouveau nid intéressant et à la fin, la plupart ou la totalité des centaines d'exploratrices danseront en promouvant la même information. Un comportement intermédiaire peut être enregistré, bien que rarement. Par exemple, deux groupes de l'essaim peuvent se séparer parce qu'ils ne sont pas d'accord sur la décision, mais comme il n'y a qu'une seule reine, ils s'éloignent un peu et les deux essaims se réunissent. Le processus de prise de décision par la recherche du consensus fonctionne aussi chez les humains, mais il est plus courant, dans notre cas, de déléguer les choix à des groupes de personnes sélectionnées (par les secrétariats des partis qui ont gagné les élections ou par une élection directe). Une fois que la décision de partir a été prise, l'essaim s'envole avec la reine des abeilles. Celle-ci émet une hormone (appelée hormone mandibulaire, qui est un acide gras à 10 atomes de carbone) qui, tant que les abeilles en vol la perçoivent, continue à voler vers le nouveau site de nidification. Si la reine s'arrête pour se reposer et qu'elles ne peuvent donc pas la sentir, elles cessent d'avancer et la cherchent jusqu'à ce qu'elles l'atteignent et s'enroulent autour d'elle. Moins de 500 abeilles sur 10.000 à 11.000 (5% au maximum) savent dans quelle direction se déplacer et elles guident l'ensemble du groupe vers la destination qui a été marquée par une hormone spéciale (un produit de la glande de *Nasonov*). L'essaim vole entre 5 et 12 km/h, bien que les abeilles individuelles puissent voler plus vite. Il est intéressant de remarquer que le groupe est organisé de telle sorte que les délibérations des individus en confrontation directe aboutissent à un raisonnement collectif largement partagé, de manière à réduire la probabilité de faire de mauvais choix. Cette méthode a donné de meilleurs résultats que la sélection sur plus de 30 millions d'années, soit la durée d'existence estimée des abeilles. Les abeilles choisissent un nid de manière démocratique, sans leader parmi les

¹ Le *quorum* définit le nombre minimum requis pour la validité juridique de la délibération ou du vote d'une assemblée, d'un conseil, lors d'élections ou de *référendums*.

exploratrices, une sorte de comité de recherche composé de quelques centaines d'abeilles. Les abeilles prennent donc des décisions importantes pour leur survie sans avoir besoin d'un chef.

L'étude du comportement des abeilles, qui est principalement régulé par des signaux chimiques, a donné lieu à des résultats étonnants et en même temps inquiétants. Il est aujourd'hui possible d'acheter des hormones qui sont libérées dans la ruche de manière contrôlée et qui restent actives jusqu'à un mois. De cette manière, il est possible d'induire artificiellement un comportement spécifique. Par exemple, il est possible d'acheter des mélanges d'hormones produites par la reine des abeilles à des fins diverses : ²²⁴

- Augmenter la collecte de pollen et réduire la production de faux-bourçons.
- Le maintien de la tranquillité des abeilles en l'absence de reine, comme c'est le cas des "paquets d'abeilles", c'est-à-dire des groupes d'abeilles ouvrières (environ 10.000 individus ou moins) utilisés pour la pollinisation pendant la courte période d'une floraison (2 semaines) et abandonnés à leur sort, c'est-à-dire à la mort.
- Empêcher les abeilles de piller les autres colonies de la même espèce.
- Le blocage de l'essaimage peut également être inhibé artificiellement par l'apiculteur en coupant les ailes de la reine des abeilles afin qu'elle ne puisse pas voler.
- Favoriser la production de cire et donc de rayons de miel.
- Attirer les abeilles dans une ruche sans reine (ces cris imitent la phéromone attractive que les abeilles éclaireuses libèrent de leurs glandes pour marquer un emplacement attractant).

En résumé, il est possible d'induire chimiquement des comportements spécifiques qui sont utiles à l'apiculteur et à l'agriculteur en achetant des produits chimiques spécifiques (hormones).

Le fumage est utilisé dans l'intention d'apprivoiser les abeilles qui, lorsqu'elles sentent la fumée, se dirigent vers les rayons et mangent le miel avec avidité. Ce comportement est probablement une conséquence du danger d'incendie et donc de la nécessité de quitter la ruche pour se sauver. L'utilisation de fumée pour calmer les abeilles et faciliter l'inspection par l'apiculteur, si elle est mal gérée, peut conduire les insectes à quitter la ruche. Les premiers fumeurs portables datent de 1873. ⁹⁷⁴

LES BOURDONS

Les bourdons sont des abeilles sauvages vivant en petites colonies, qui sont apparues sur Terre il y a environ 30 à 40 millions d'années. ⁶⁸⁸ Les bourdons sont probablement des descendants végétariens des guêpes. Il existe au moins 250 espèces, dont 48 se trouvent en Europe ; à titre de comparaison, il y a environ 25.000 espèces d'abeilles connues. Ils vivent en colonies matriarcales dirigées par une reine, la seule femelle fertile de la famille. ²⁴⁴ Les reines qui survivent à l'hiver, déjà fertiles, fondent une nouvelle colonie. Ainsi, la reine est la seule à survivre à l'hiver dans une sorte d'hibernation.

La reine ne s'accouple généralement qu'avec un seul mâle. Pendant l'accouplement, le mâle dépose une colle collante sur la femelle afin qu'un autre mâle ne puisse pas s'accoupler. Les premières éclosions sont toutes des femelles, les ouvrières, qui s'occupent des travaux communautaires : elles produisent la cire pour l'agrandissement du nid fondé par la reine, elles collectent et stockent le nectar et le pollen pour élever de nouveaux descendants et nourrir la reine, qui ne pond plus que des œufs. À la fin de l'été, certaines femelles sont accouplées pour devenir des reines. Les femelles, comme l'abeille domestique, ont un dard, mais contrairement à cette dernière, elles peuvent piquer plusieurs fois un être humain en lui injectant leur venin sans mourir et peuvent également le mordre (le venin contient diverses substances comme des histamines). Les ouvrières des bourdons, contrairement aux ouvrières des abeilles domestiques, peuvent être de taille très variable. Cette variabilité s'observe également chez certaines fourmis

où les ouvrières ont des corps différents car elles se sont adaptées à des tâches différentes. Chez les bourdons, les petites ouvrières restent généralement pour effectuer les travaux dans le nid, tandis que les plus grandes sont les exploratrices capables de transporter en vol une quantité de nourriture égale à leur poids corporel (environ 150 mg de nectar dans le tube digestif et du pollen sur les pattes). Les exploratrices ont une espérance de vie d'environ deux à trois semaines.

Les bourdons peuvent être très résistants au froid : *Bombus polaris* vit dans les limites du cercle polaire. De nombreuses espèces de bourdons aiment nicher sous terre, mais comme ils sont mauvais creuseurs, ils explorent les trous existants, comme les trous de souris. Certaines espèces de bourdons (*Bombus pratorum*) nichent dans d'anciens nids d'oiseaux et peuvent même en faire fuir le propriétaire, comme c'est le cas du *Bombus niveatus* qui est capable de faire fuir le rougequeue à front blanc bien qu'il soit beaucoup plus petit que cet oiseau migrateur.⁶⁸⁸ D'autres bourdons peuvent nicher dans les trous des troncs d'arbres (*Bombus hypnorum*).

La connaissance des habitudes écologiques d'insectes tels que les bourdons permet d'ouvrir une parenthèse sur l'importance de l'absence de travail du sol, de la présence d'arbres et d'oiseaux et de la présence de fleurs. Tous ces facteurs sont indispensables aux bourdons et à des milliers d'espèces d'insectes utiles aux agriculteurs. Le labourage du sol, l'absence de zones semi-naturelles ou naturelles, l'absence d'arbres, la disparition des oiseaux et l'utilisation d'herbicides empêchent la survie de ces insectes pollinisateurs utiles et d'autres.

Les bourdons produisent de la cire dans des glandes spéciales, qui sert à construire des espaces pour contenir le miel et le pollen. La reine bourdon peut faire éclore ses œufs comme le font les oiseaux afin de les maintenir aux alentours de 30°C (ils se réchauffent en faisant vibrer leurs muscles). La femelle, afin de maintenir les œufs au chaud, peut consommer une quantité de sucre égale à son propre poids. Cela signifie qu'elle peut avoir besoin de visiter des milliers de fleurs chaque jour pour couvrir les œufs. En vol, elle bat ses ailes à la vitesse incroyable de 200 battements par seconde et peut se déplacer à 25 km/h. C'est pourquoi, si les fleurs sont peu nombreuses et éloignées du nid, les œufs se refroidissent et le bourdon risque de ne pas disposer de l'énergie nécessaire pour établir la colonie formée par quelques centaines de filles ouvrières (toutes issues d'œufs fécondés). Les bourdons ouvriers peuvent remplir diverses fonctions telles que la recherche de pollen et de nectar et le refroidissement du nid. À un moment donné, des mâles ou d'autres reines apparaissent dans la colonie. Comme chez l'abeille domestique, les mâles sont issus d'œufs non fécondés générés en été, suivant des signaux hormonaux spécifiques. Les reines des bourdons ne s'accouplent qu'une seule fois et hibernent ensuite.

Certains des comportements curieux observés chez les bourdons sont intéressants. Si la langue du bourdon terrestre est trop courte pour atteindre le nectar d'une fleur, il peut y faire un trou pour l'emporter, auquel cas il ne joue pas le rôle de pollinisateur.

Lorsque le bourdon se pose sur une fleur, il laisse une trace chimique qui avertit le prochain visiteur probable de ne pas perdre de temps car il vient d'être vidé (il laisse des molécules volatiles avec ses pattes). Les différentes fleurs ont des temps de remplissage différents (de l'ordre de quelques minutes ou de quelques heures), mais les bourdons semblent reconnaître dans chaque type de fleur si cela vaut la peine de perdre du temps ou non : peut-être mettent-ils en corrélation la trace olfactive de la fleur avec l'intensité de la trace chimique laissée par le visiteur précédent.

Le plant de tomate a besoin des bourdons pour effectuer la pollinisation, car ils sont capables d'extraire les grains de pollen et de les transporter. À cet égard, il convient de rappeler que l'Italie est le troisième producteur mondial de tomates (2015), le premier en Europe et produit 48% des tomates transformées de l'Union européenne.⁴⁵²

HÉRÉDITÉ ET SOCIALITÉ

Chez les humains, chaque individu possède 50% des caractéristiques génétiques de ses parents et 50% de celles de sa progéniture et de ses frères et sœurs. En outre, il existe deux chromosomes X chez les femmes et un X et un Y chez les hommes (ce sont les chromosomes sexuels). Chez les abeilles comme *Apis mellifera* et les bourdons, les choses sont différentes. Tout d'abord, le sexe est déterminé par un seul gène. Les abeilles femelles possèdent deux copies de chaque chromosome car elles sont issues de l'accouplement du mâle et de la reine des abeilles et sont diploïdes. Ainsi, si l'insecte possède deux copies du gène responsable du sexe, il est destiné à devenir une femelle. Si, en revanche, il n'y a qu'une ou deux copies identiques du gène sexuel, il est destiné à devenir un mâle. Par conséquent, les mâles n'ont pas de père (ils sont haploïdes) et tous les spermatozoïdes contiennent le même ensemble de gènes (ils ne subissent pas de méiose ; les caractéristiques récessives seront plus fréquentes chez les mâles que chez les femelles parce qu'il n'y aura pas de deuxième allèle sur le chromosome homologue).

Un faux-bourdon peut éjaculer entre 0,9 et 1,7 microlitre de liquide séminal contenant entre 3 et 12 millions de spermatozoïdes, tous génétiquement identiques. Ce système de descendance génère des degrés de parenté différents de ceux de l'espèce humaine. Les filles sont apparentées à 50% à leur mère et à 50% à leur père car elles sont le résultat de la fécondation de l'ovule par le sperme. Cependant, ils sont apparentés à 75% les uns aux autres car ils reçoivent tous le même patrimoine génétique du père et partagent en moyenne 50% des gènes avec la mère. Dans le même temps, le père a 100% des gènes transmis à ses filles, mais aucun chez les mâles. Ainsi, une abeille ouvrière est apparentée à 50% à sa mère et à 75% à ses sœurs (si elles ont le même père). Les sœurs sont plus liées entre elles qu'à la mère. La mère partage 50% des gènes avec sa progéniture mâle (la femelle de l'acarien *Varroa*, un parasite redouté des apiculteurs, génère des œufs haploïdes qui donneront naissance à des mâles et des œufs diploïdes (c'est-à-dire fécondés) qui donneront naissance à des femelles, comme le font les abeilles). L'un des résultats de cette transmission particulière des caractères héréditaires est que les abeilles ouvrières, si elles décident de s'accoupler, produiront une progéniture possédant 50% de leurs gènes, alors que si elles laissent la reproduction à la reine, elles verront augmenter le nombre d'individus possédant 75% de leurs caractères génétiques. Les abeilles ouvrières ont donc intérêt à laisser la reproduction à la reine et à aider ses sœurs à augmenter le nombre de copies de leurs gènes au sein de la colonie. Cette invention de l'évolution a favorisé le comportement hautement social des abeilles (abeilles domestiques et bourdons) et celui des fourmis. Il est plus avantageux d'aider la mère et les sœurs à produire d'autres sœurs que de se reproduire elles-mêmes. Les sœurs ne bénéficient pas de la reproduction des mâles car elles ne partagent que 25% des gènes avec eux. La reine des abeilles peut bénéficier de la reproduction des mâles et des femelles avec lesquels elle partage 50% des gènes, tandis que les sœurs n'ont besoin que de reproduire d'autres femelles (qui seront des sœurs). Mais les abeilles ouvrières issues d'œufs non fécondés pourraient produire une progéniture mâle avec laquelle elles auraient 50% des gènes en commun au lieu des 25% qu'elles ont avec leurs frères et sœurs mâles. Il y a donc un conflit entre les intérêts de la reine des abeilles et ceux des abeilles ouvrières. La reine des abeilles n'a aucun intérêt à avoir des petits-enfants avec lesquels elle ne partagerait que 25% des caractéristiques génétiques. Les abeilles ont développé de nombreux mécanismes pour réduire ce conflit, comme le cannibalisme : chez les bourdons, la reine mange les œufs des ouvrières. Chez certaines espèces de bourdons, jusqu'à 10% des mâles peuvent provenir des ouvrières et non de la reine. Parfois, les ouvrières peuvent même tuer la reine des abeilles. Cependant, la plupart des mâles proviennent généralement de la reine des abeilles et, dans le cas des abeilles domestiques, s'ils reviennent à la ruche après la saison de reproduction, ils sont tués.

Un comportement intéressant est celui du bourdon coucou. Le coucou est un oiseau célèbre pour son comportement reproducteur particulier : il pond ses œufs dans les nids d'autres espèces d'oiseaux et le poussin pousse les autres poussins hors du nid, les tuant. D'autres oiseaux adoptent également ce comportement, comme les poules d'eau et certains canards. L'avantage de ce comportement est qu'il permet de produire davantage de descendants. Des études indiquent qu'au sein d'une colonie de bourdons, plus de 95% des mâles sont issus de la reine et le reste des filles de la reine, mais un faible pourcentage provient d'ouvrières d'autres colonies. Dans la colonie, il n'est pas dans l'intérêt de l'abeille ouvrière fille de la reine de pondre des œufs car elle est plus liée à ses sœurs qu'à ses enfants. Si une abeille ouvrière parvient à entrer dans un autre nid et n'est donc pas apparentée à la reine, elle a un avantage pour pondre des œufs car elle augmente la probabilité de transmettre ses gènes en s'occupant d'une autre colonie. Ce comportement a été observé chez au moins deux espèces de bourdons (*Bombus terrestris* et *Bombus deuteronymus*).

Un comportement observé chez certaines espèces de bourdons est l'intrusion d'une reine dans une colonie d'une autre espèce de bourdons. L'intrus tue la reine de la colonie et évite ainsi les premières phases de soins de la colonie. Les travailleurs qui ne sont pas apparentés à l'usurpateur deviennent des esclaves. Ce type de bourdon coucou possède une reine plus grande et plus forte, ce qui lui permet de dominer facilement la reine rivale. En même temps, il ne possède pas de structures de collecte de pollen sur ses pattes car il n'en a pas besoin. La reine des abeilles envahissantes pondra ses œufs et les ouvrières esclaves s'occuperont d'elle jusqu'à sa mort. Puis, avec le temps, les travailleurs esclaves seront remplacés par les filles de l'usurpateur et le cycle continuera. On connaît au moins 30 espèces de bourdons coucous, chacune étant spécialisée dans la colonisation d'une autre espèce (*Bombus vestalis* cible *Bombus terrestris*). Pour réduire l'agressivité des colonies asservies, les bourdons coucous imitent souvent à la fois les couleurs et les signaux chimiques de leurs cibles.

LES FOURMIS : DIVISION DU TRAVAIL ET COOPÉRATION

Le règne animal n'a pas besoin de notre imagination pour se révéler aussi extraordinaire que la biologie des insectes tels que les abeilles, les fourmis ou les bourdons. Les fourmis forment un superorganisme très fascinant. Pour submerger l'ennemi, elles peuvent utiliser de multiples stratégies telles que la tromperie chimique, la surveillance spécialisée et l'assaut de masse. Dans les cas extrêmes, certaines fourmis peuvent jeter des cailloux sur leurs adversaires, tandis que d'autres effectuent des raids d'esclaves pour augmenter leur effectif. Les fourmis existent probablement depuis 100 millions d'années, et leur origine remonte donc à l'époque des dinosaures. Il existe environ 270 espèces de fourmis en Italie, plus de 500 en Europe et probablement plus de 15.000 dans le monde.⁸²⁵ En Italie également, les fourmis sont des jardiniers très utiles car elles contribuent à la distribution des graines.

Les fourmis, comme les abeilles sociales, vivent en grandes communautés avec une organisation très complexe qui leur procure de nombreux avantages lorsque les ressources sont abondantes. En général, les insectes solitaires sont de meilleurs pionniers et s'en sortent mieux lorsque les ressources sont rares. Les sociétés de fourmis sont probablement nées d'agrégations de guêpes solitaires.

Les fourmis sont intéressantes à bien des égards, ce qui les lie en partie aux abeilles :⁷¹⁰

- Comme les abeilles, certaines espèces de fourmis participent à la pollinisation et se nourrissent de nectar (on a par exemple constaté que certaines espèces contribuent à la pollinisation des orchidées).
- Comme les abeilles, elles forment une société féminine dans laquelle la reine est exclusivement responsable de la reproduction. Chez certaines fourmis, le développement

des larves est influencé par la température : celles qui sont élevées à des températures plus élevées ont tendance à développer des reines.⁹⁷⁴

- La reine fourmi produit des phéromones qui inhibent la production d'œufs par les ouvrières et les reines vierges (dans ce cas, si la reine est enlevée, les ouvrières commenceront à pondre des œufs, si le cadavre reste à l'intérieur du nid, les phéromones continueront à inhiber la fertilité).
- Les fourmis sont toutes sœurs car elles sont les filles de la même reine qui ne produit que des mâles à partir d'œufs non fécondés ; les mâles sont présents pendant les courtes périodes de l'année de reproduction et vivent généralement quelques semaines.
- Même chez les fourmis, l'alimentation peut déterminer si elles deviennent des ouvrières ou des reines. Chez certaines espèces, on a constaté que c'est la température qui détermine le sort des œufs.
- Ils peuvent avoir une piqûre comparable à celle des abeilles.
- Elles ont une organisation complexe composée de différentes castes dont la fourmi ouvrière est la plus nombreuse, comme c'est le cas pour l'abeille domestique ; contrairement à cette dernière, les différentes castes ont des corps très différents et les colonies peuvent être beaucoup plus nombreuses car elles peuvent comprendre des millions d'individus. Il peut y avoir beaucoup plus de castes chez les fourmis, par exemple chez les fourmis ouvrières qui auront également des corps très différents (les fourmis soldats peuvent être des centaines de fois plus grandes que leurs sœurs qui effectuent d'autres tâches).
- Elles élèvent des insectes qui produisent le miellat sucré dont se nourrissent également les abeilles (pucerons et cochenilles) ; le terme "miellat" est utilisé par les entomologistes pour désigner les excréments des pucerons qui sont riches en sucres et en nutriments utiles aux fourmis et à d'autres animaux tels que les abeilles ; certaines colonies de fourmis peuvent tirer de ces sécrétions une grande partie de leurs besoins alimentaires.
- Elles sont de bons bio-indicateurs, par exemple de la santé des sols et des forêts ; dans certaines régions du monde, il est possible de trouver des centaines d'espèces différentes sur quelques hectares (par exemple, 300 espèces sur 8 hectares de forêt tropicale péruvienne).⁸²⁵
- Les fourmis peuvent piller les abeilles : une grande fourmi des bois (*Formica rufa*) peut consommer plusieurs dizaines de kilos de miel par an. La fourmi d'Argentine (*Linepithema humile*) est arrivée en Europe et en Italie en provenance d'Amérique du Sud. Elle est classée comme une espèce invasive très dangereuse et est capable d'endommager les colonies d'abeilles en se nourrissant des œufs, des larves et des jeunes abeilles.⁹⁷² Cependant, les fourmis peuvent également jouer un rôle important dans le maintien de l'hygiène au sein de la colonie en ramassant les insectes morts et autres débris organiques.⁹⁷³
- L'acide formique, qui est produit par certaines fourmis pour se défendre (guerre chimique naturelle), est également utilisé par les apiculteurs, par exemple pour lutter contre les larves de coléoptères parasites (comme celles d'*Aehtina tumida*).
- Les mâles et les femelles de nombreuses espèces de fourmis effectuent des vols nuptiaux, formant ainsi des essaims volants pour s'accoupler ; la reine fourmi, après son vol nuptial, enlève ses ailes et commence à chercher un endroit approprié pour former un nid. En général, les fourmis vivent plus longtemps que les abeilles, car certaines reines vivent plus de 20 ans et certaines reines de termites vivent beaucoup plus longtemps (jusqu'à 50 ans).⁹⁷²

Comme les abeilles, les fourmis ouvrières renoncent à avoir des enfants pour le bien de la colonie. Les sœurs sont issues d'un père qui est né d'un œuf non fécondé, elles partagent donc les trois quarts de leurs gènes. Tous les spermatozoïdes produits par une fourmi ou une abeille mâle générés pour produire leurs filles sont les mêmes. Les sœurs sont génétiquement plus proches les unes des autres que des autres animaux : 75% au lieu de 50%. Cet héritage favorise l'altruisme : les sœurs se ressemblent davantage entre elles qu'avec leur progéniture potentielle. Il est plus avantageux d'élever des sœurs que des filles si l'objectif reste de transmettre le plus possible de caractéristiques génétiques similaires. Il devient favorable de s'occuper de sa mère qui produira des sœurs génétiquement plus semblables que des filles potentielles. Ce mécanisme altruiste n'est pas aussi fort chez les mâles qui ne partageront qu'un quart des gènes avec leurs sœurs. Il est donc préférable de s'occuper de peu de mâles et de n'inséminer les reines que lorsqu'il le faut : c'est ce qui se passe dans les colonies d'abeilles et de fourmis.

- Les fourmis adoptent des comportements sociaux fascinants, comme la culture de champignons et l'asservissement d'autres espèces de fourmis. En outre, contrairement aux abeilles, elles peuvent interagir entre différentes colonies, construisant ainsi un réseau d'interactions très complexes. Certaines espèces entretiennent des relations sociales entre les colonies adjacentes, de sorte qu'elles forment des super colonies qui peuvent occuper de vastes zones (plus de 25 hectares) et maintenir le contact avec de nombreuses colonies conspécifiques. Dans ce cas, des communautés se forment qui peuvent dépasser la centaine de millions d'individus (les fourmis *Atta cephalotes* peuvent former des colonies de 5 millions d'individus, la reine peut vivre 15 ans et peut former des nids de 7 mètres de profondeur).^{825, 826} Il a été observé que certaines fourmis (*Oecophylla smaragdina*) peuvent même maintenir des nids de type caserne avec des travailleurs âgés montant la garde aux frontières du territoire. Les fourmis migrent, font la guerre à leurs congénères et à d'autres espèces, peuvent se reproduire par parthénogenèse, c'est-à-dire sans mâle, produisent des poisons, de la soie et bâtissent des constructions qui peuvent être très grandes.

Voici d'autres aspects étonnants des fourmis :

- Les fourmis de Brunei ont des gardes qui se font sauter la tête en cas de menace : le résultat est un borbier gluant qui ralentit les envahisseurs.⁸⁴⁸
- Elles sont célèbres pour leur capacité à porter des centaines de fois leur propre poids.
- Elles se nourrissent d'une quantité énorme d'insectes, donc l'aspect négatif considéré de pouvoir propager des insectes phytophages tels que les pucerons et les cochenilles peut être compensé par leur action de défense des plantes. Une colonie de fourmis des bois peut se nourrir de centaines de milliers d'insectes en été, aidant ainsi les plantes. Pour cette fonction, elles ont été utilisées dans la lutte biologique : une colonie de fourmis des bois peut collecter des dizaines de milliers de chenilles en une seule journée. Dans le passé, les fourmis (*Formica rufa* ou fourmis de feu) ont été proposées comme moyen de lutte biologique contre les papillons de nuit processionnaires.^{720, 828} Ce papillon génère des larves, les chenilles, qui servent à se déplacer sur le sol les unes après les autres, en formant de curieuses rangées (les papillons de nuit processionnaires). Les larves de ce papillon se nourrissent d'aiguilles de conifères et sont urticantes. On estime que quatre fourmilières par hectare peuvent être efficaces pour lutter contre de nombreux parasites des plantes.
- Elles participent au processus utile qui rend le sol vivant et fertile. Elles se nourrissent également de carcasses mortes et participent au recyclage de la matière organique.
- Elles sont responsables de la propagation de nombreux types de graines et sont donc les jardiniers de nombreuses espèces végétales. Comme les écureuils, les fourmis oublient

où elles ont caché leurs graines et participent donc à la dissémination de nombreuses plantes comme les plantes herbacées. Une colonie de certaines espèces peut contribuer à la dispersion de milliers de graines chaque année. On sait que certaines espèces ont appris à endommager les graines qu'elles transportent dans leurs nids afin qu'elles ne puissent pas germer. Les autres animaux du jardin sont les geais et les noisetiers, des oiseaux qui dispersent les graines de certains pins. Un exemple représentatif est l'évolution du gui, une plante parasite, qui s'installe sur les branches des arbres. Les graines de gui doivent être placées sur la partie aérienne des plantes qui les nourrira. Pour ce faire, elles produisent des baies qui sont appétissantes pour de nombreux oiseaux. Les baies contiennent une substance gélatineuse très visqueuse qui reste intacte lors de son passage dans le tube digestif. Lorsqu'un oiseau se nourrissant de ces baies essaie de nettoyer son bec sur une branche ou défèque, il distribue les graines sur les branches des arbres. Certains oiseaux semblent être capables de choisir les branches les plus appropriées pour la distribution de ces graines.

- Les graines de plus de trois mille espèces de plantes contiennent une substance attractive pour les fourmis, appelée *élaïosine*, qui contient des graisses. Les fourmis trouvent ces graines et les apportent dans la fourmilière, sous terre. Une fois à l'intérieur, la graine est débarrassée de l'*élaïosine*, qui forme un appendice gras, et jetée, encore viable, sur un tas de déchets. Ici, la graine peut germer. Les graines prélevées sur les fourmis ont plus de chances d'échapper aux prédateurs tels que les oiseaux. Les interactions entre les espèces, dans certains cas, sont vraiment étonnantes et merveilleuses. En Australie, où les graines avec ce paquet cadeau de fourmis sont répandues, il existe une espèce d'insecte en bâton qui produit des œufs imitant les graines de la plante. Les œufs de cet insecte contiennent également un cadeau pour les fourmis, ce qui les pousse à les ramasser et à les emmener sous terre pour les protéger des parasites. Certaines plantes ont développé un mécanisme encore plus élaboré. Par exemple, certains arbustes méditerranéens produisent des fruits charnus à l'intérieur desquels se trouvent des graines contenant l'*élaïosome*. Les oiseaux consomment le fruit et évacuent les graines avec l'*élaïosome* encore attaché. Les fourmis récupèrent ensuite les graines dans les excréments et les enterrent. Dans ce cas, les plantes produisent un double cadeau, un pour les oiseaux et un pour les fourmis : elles pourront ainsi voyager beaucoup plus loin. Il convient de rappeler que certaines graines ne sont pas seulement des voyageuses de l'espace mais aussi des voyageuses du temps. Les graines dormantes sont capables de ralentir leur métabolisme et de ne pas germer, restant ainsi viables pendant des siècles. La plus ancienne à avoir germé date de quelque deux mille ans : elle a été retrouvée lors de fouilles archéologiques en Israël.⁷⁰⁴ Le sol peut donc constituer une réserve de semences très importante. Les jardiniers amateurs savent depuis longtemps que certaines graines se conservent pendant des années, tandis que d'autres doivent être achetées chaque année. Ces exemples sont utiles pour souligner le fait que la propagation d'une espèce peut générer de nombreux changements imprévisibles.
- Les colonies de fourmis sont capables de favoriser certaines plantes en modifiant la composition des espèces végétales dans le milieu environnant : en les défendant contre les parasites phytophages, en distribuant des graines ou en endommageant certaines espèces.⁷¹⁰ En retour, les plantes, en plus de donner des graines, peuvent offrir de l'eau, un abri et des nutriments tels que des fruits et du nectar (des centaines de plantes sont connues pour offrir un abri aux fourmis). Une symbiose connue depuis longtemps est celle entre les acacias et certaines fourmis qui, en échange de l'hospitalité, réduisent la présence de plantes concurrentes dans le voisinage proche et les défendent contre les insectes parasites.

- D'autres espèces, comme les guêpes et les coléoptères, peuvent également vivre dans les nids des fourmis.
- Elles peuvent communiquer non seulement par des signaux chimiques (la règle est la suivante : quiconque ne sent pas comme moi est un ennemi potentiel ou une nourriture possible) mais aussi par des signaux visuels, tactiles et sonores. Par exemple, les fourmis ensevelies par de fortes averses peuvent appeler à l'aide par des sons afin que leurs sœurs les déterrent.
- Les fourmis ont des spécialisations sensationnelles dans leurs castes, comme la fourmi du seau à miel (*Myrmecocystus mimicus*), dont certains individus ont un abdomen hypertrophié où ils accumulent des nutriments qui serviront à nourrir la colonie.⁸²⁷
- Les fourmis reines de certaines espèces, au cours des premiers stades de l'établissement de la colonie, après le vol nuptial et l'accouplement, peuvent former des alliances entre elles. Par exemple, une reine vierge peut aider une autre reine fécondée dans sa recherche de nourriture.⁷²⁰
- Plus de 200 espèces de fourmis sont capables d'être des agriculteurs, cultivant des champignons qu'elles mangent ensuite : elles les nourrissent avec leurs excréments en plus des plantes et les défendent avec des bactéries.⁸⁴⁸ Les fourmis (par exemple le genre *Atta*) peuvent cultiver des champignons sur des végétaux frais apportés à l'intérieur de leur nid. Elles se comportent comme des jardiniers à l'intérieur de terriers souterrains. Les plus grands nids de certaines colonies de fourmis, composés de millions d'individus, peuvent comporter un millier de chambres, dont quelques centaines sont occupées par la culture des champignons.
- Les fourmis peuvent élever des pucerons et des cochenilles, les protégeant, les soignant et les transportant avec elles. Comme les bergers, si la nuit est trop froide, elles prélèvent les pucerons sur les pousses des plantes et les transportent vers la chaleur de leur nid souterrain. En outre, certaines espèces se nourrissent de la sève ou mangent les feuilles et les fruits. C'est pourquoi les fourmis peuvent être considérées comme des nuisibles par les agriculteurs.

Parmi les comportements intéressants qu'affichent les insectes sociaux tels que les fourmis figure la servitude, qui est une forme de parasitisme social. Certaines colonies de fourmis attaquent des colonies de la même espèce ou d'autres espèces de fourmis. Après avoir neutralisé les défenseurs adultes, elles enlèvent les stades juvéniles (pupes). Les jeunes fourmis kidnappées sont élevées comme esclaves pour augmenter la population de travailleurs. Dans les cas extrêmes, les fourmis esclaves sont complètement dépendantes des fourmis captives. L'évolution a produit des interactions très spécifiques entre les fourmis esclaves et les fourmis captives, au point que les fourmis captives ne s'enfuient pas mais se considèrent comme les sœurs de leurs ravisseuses.⁶⁹³ L'esclavage peut donc être facultatif ou obligatoire et peut être temporaire ou permanent.

Une autre caractéristique intéressante des fourmis est leur capacité à chasser en groupe, ce qui leur permet de s'attaquer à des insectes pesant des milliers de fois plus qu'une seule fourmi. Les fourmis légionnaires (*Eciton burchelli*) d'Amérique centrale et du Sud forment des colonies de 300.000 à 700.000 adultes. Pendant la phase de migration, la colonie est organisée en plusieurs colonnes d'ouvrières, protégées de part et d'autre par des soldats spécialisés, tandis que la reine est constamment protégée par un groupe d'ouvrières grim pant sur son corps. Les larves et les nymphes qui ne se sont pas encore développées en insectes adultes sont transportées entre les mandibules par les ouvrières plus petites. Les colonnes de travailleurs peuvent dépasser 50 mètres de long et se déplacer sur 90 mètres par jour. Pendant la période de migration, une colonie peut tuer plus de 90.000 arthropodes en une seule journée.^{699, 824} On a identifié plus de

300 espèces qui vivent en association avec ces fourmis légionnaires, comme les oiseaux formicoles et certains acariens.

Comme de nombreux animaux, certaines fourmis ont le comportement de faire semblant d'être mortes lorsqu'elles sont en danger et peuvent vivre dans le même nid que d'autres espèces de fourmis, comme des colocataires dans un immeuble d'habitation. La construction d'un nid de fourmis sous terre peut nécessiter le déplacement de plus de 100 kg de terre. Les nids de fourmis fournissent de la nourriture à de nombreux animaux tels que d'autres espèces de fourmis et des arthropodes nuisibles (araignées, pucerons), des oiseaux comme le pic noir ou le faisan, des lézards. Le pic vert est capable de manger des centaines de fourmis par repas. ⁸⁴⁸

ABEILLES ET APPLICATIONS TECHNOLOGIQUES

ABEILLES SUIVIES PAR DES MICRO-ANTENNES

L'une des technologies utilisées par les chercheurs pour suivre les insectes volants tels que les abeilles (*Apis mellifera*) et les bourdons (*Bombus terrestris*) est le radar.^{108, 109, 110} Le radar harmonique¹ émet des ondes dans l'environnement, qui rebondissent sur des dispositifs non linéaires (par exemple, une antenne fixée sur l'insecte) et sont ensuite captées à nouveau par le radar lui-même.¹¹¹ Par conséquent, les transpondeurs placés sur l'insecte n'ont pas besoin d'être alimentés en énergie (piles). Les radars harmoniques sont dotés d'une antenne rotative, d'un transpondeur fixé à l'insecte à traquer et nécessitent un ordinateur doté d'un programme spécial. Avec ces instruments, il est possible de suivre un mouvement jusqu'à une distance maximale de 3 km, en l'absence d'obstacles tels que des arbres ou des maisons.¹⁹⁵ Le radar est capable de détecter la position de l'insecte à une certaine fréquence (par exemple toutes les 3 secondes) : c'est un facteur limitant.^{114, 1191} Si les abeilles se déplacent à une vitesse de 20 km/h et si l'antenne fait un tour toutes les 3 secondes, cela signifie que nous pouvons avoir une précision de 15 m, alors que si elles se déplacent à 5 km/h, cela signifie que nous pouvons avoir une précision d'environ 5 m. La capacité de suivre les abeilles à une distance de 1,2 km est limitée à une distance comprise entre 70 cm et 9 m. Ainsi, lorsqu'elles volent à basse altitude ou entre les usines, elles ne peuvent pas être suivies. Les abeilles ouvrières (*Apis mellifera*) ont probablement été étudiées avec cette technique pour la première fois il y a moins de 20 ans.¹⁰⁹ Grâce à ces instruments, il a été possible de suivre les vols d'exploration effectués pour s'orienter en dehors de la colonie (ce sont les premiers vols effectués par les abeilles les plus jeunes) et ceux effectués pour obtenir de la nourriture (nectar, pollen et miellat) et de l'eau. Les vols à la recherche de nourriture sont effectués par les abeilles les plus expérimentées, qui sont les plus anciennes. Avant de commencer à chercher de la nourriture, les abeilles domestiques effectuent des vols d'exploration pour s'orienter (la distance moyenne des vols d'exploration est de 100 m de la ruche ; cependant, les bourdons collectent également du pollen lors de leur premier vol).¹¹² Les vols exploratoires prennent du temps, consomment beaucoup d'énergie (les abeilles ne récoltent pas de nourriture pendant ces vols) et sont risqués. Ces vols sont également effectués à nouveau par des abeilles expérimentées lorsque la ruche est déplacée (apiculture nomade). Une abeille expérimentée peut apprendre à se réorienter en un seul vol, alors qu'une jeune abeille (âgée de trois semaines) a besoin d'au moins six vols (entre 1 et 18 vols, avec une moyenne de six vols d'environ six minutes chacun ; selon une autre étude, trois vols d'orientation suffisent pour une abeille inexpérimentée) lorsqu'elle quitte la ruche pour la première fois.^{108, 113} L'utilisation du radar harmonique a permis d'étudier ces différents types de vol et le comportement des abeilles. Le radar harmonique reconnaît l'insecte en vol grâce à un répondeur, qui est une petite antenne placée sur le thorax. Cette petite antenne, appelée transpondeur, peut mesurer de 12 à 16 mm de long, 0,3 mm de diamètre et peser entre 0,8 et 25 mg. Le poids comprend l'antenne, l'étiquette qui marque le thorax de l'abeille et à laquelle l'antenne est fixée,

¹ La définition du radar harmonique est souvent utilisée pour spécifier les circuits ou systèmes électroniques qui traitent et manipulent des signaux électromagnétiques à haute fréquence. Dans le cas des signaux de radiofréquence par voie aérienne, il s'agit d'ondes électromagnétiques de fréquences comprises entre quelques kHz et 300 GHz. Les longueurs d'onde vont de 100 km (à 3 kHz) à 1 mm (à 300 GHz). La radiofréquence est généralement utilisée pour désigner un signal électrique ou une onde électromagnétique à haute fréquence se propageant dans l'espace ou dans un câble coaxial.¹¹¹

et la colle. ¹³ Une abeille ouvrière pèse environ 100 mg et peut porter ce poids assez facilement, alors qu'un bourdon pèse deux fois plus et peut porter des charges plus importantes.

Les instruments utilisés par les chercheurs ont une portée comprise entre 400 m et 1.000 m, avec une précision de ± 7 et jusqu'à ± 2 m de rayon (et une précision en hauteur de $\pm 3,5$ m). ^{108,109, 110.}

¹¹³ Il convient de souligner que les abeilles peuvent facilement se déplacer pour chercher de la nourriture sur une distance de plusieurs kilomètres, donc hors de portée des radars.

Les informations qui peuvent être obtenues par l'utilisation d'un radar sont (si elles ne sont pas hors de portée) :

- le temps passé en l'air ;
- la vitesse du vol ;
- distance ;
- l'itinéraire emprunté ;
- la taille de la zone explorée.

Cette technique a montré que les vols des abeilles butineuses expérimentées sont plus rapides (les abeilles expérimentées peuvent maintenir une vitesse moyenne d'environ 20 km/h), plus longs et plus directs. ¹¹³ Il a été démontré que les abeilles sont capables de revenir à la ruche même si elles sont déplacées artificiellement vers un lieu inconnu, à 4 km de distance, sans aucun problème. ¹¹²

Un prototype de radar entomologique a été développé pour détecter les nids de *Vespa velutina* en capturant les individus (par exemple lorsqu'ils s'attaquent aux abeilles près des ruches) et en suivant leur vol jusqu'au nid. Cette guêpe (c'est un frelon) se nourrit d'abeilles et est une espèce non indigène en Europe.

Les systèmes de suivi ont certaines limites : ¹⁰⁸

- Le poids et l'encombrement peuvent être tels qu'ils entravent le vol et modifient le comportement.
- Ils ont la capacité de détecter des signaux à quelques centaines de mètres seulement.
- Ils sont incapables de détecter les insectes qui se reposent sur les fleurs ou sur le sol, ainsi que ceux qui se cachent derrière des obstacles tels que des maisons ou des arbres. En dessous d'une hauteur de 70 cm au-dessus du sol, le signal est perdu.
- La nécessité de coller l'antenne sur l'abeille au moment où elle décide de partir et la nécessité de la détacher au retour de l'abeille, avant qu'elle ne tente d'entrer dans la ruche (c'est-à-dire en quelques heures ou minutes dans la même journée) sont d'autres limitations.
- La biosurveillance n'est pas très précise car elle indique une position dans un rayon d'au moins 2 m. Il n'est donc pas possible de déterminer sur quelle fleur l'abeille s'est posée, par exemple.
- Un seul insecte peut être suivi à la fois.
- Entre 7 et 20% des abeilles ne reviennent pas à la ruche parce qu'elles meurent, probablement (par exemple, à cause de la prédation, des insecticides). Plus de 15% des abeilles équipées de récepteurs ne reviennent pas à la ruche. Dans ce cas, le signal et le transpondeur sont perdus.

Un autre système est un dispositif d'identification par radiofréquence (RFID). Ce système consiste en une étiquette électronique qui est fixée sur le dos de l'insecte. L'énergie nécessaire au fonctionnement de ce dispositif porté par l'insecte est fournie par le dispositif de lecture appelé scanner : il n'a donc pas besoin de piles comme un transpondeur. Lorsque l'abeille passe à proximité du scanner, elle recharge l'étiquette électronique par induction, sans contact. ¹⁹⁵ L'étiquette électronique contient un microprocesseur (puce), peut peser quelques milligrammes (2-4 mg) et a une taille de 0,8-1,6 mm³ (un modèle d'émetteur RFID mesure 2 x 1,6 x 0,5 mm et

pèse 4 mg).^{743, 872} Cette étiquette électronique peut peser 3% du poids de l'insecte (3 mg) ; rappelons que l'abeille ouvrière pèse environ 120 mg et est capable de transporter 70 mg de nectar dans son tube digestif et 10 mg de pollen sur ses pattes arrière. L'étiquette transportée est détectée lorsque l'insecte passe à une distance comprise entre 2 et 4 mm du détecteur (le scanner) qui nécessite un ordinateur (cette distance est une limite). L'étiquette doit être perpendiculaire au scanner et ne doit pas être salie (par exemple par du pollen), ce sont d'autres limites.¹³ Il est donc nécessaire de placer des tunnels avec le scanner qui doivent former un passage pour les insectes. De cette manière, il est possible d'obtenir des informations sur les insectes marqués.³⁸⁵

Le comportement des abeilles peut être étudié avec différentes techniques et différents objectifs, comme la détection des changements de comportement générés par les insecticides.¹⁹⁵ Certaines techniques avancées consistent à utiliser des rayons X pour mesurer de manière non invasive la force et le nombre d'une colonie.⁷⁷² Une autre possibilité est l'utilisation de caméras vidéo à haute résolution dont les images peuvent être traitées par des applications informatiques. Il est ainsi possible de mesurer rapidement des surfaces, comme celles des alvéoles remplies de larves plutôt que de miel, ou des zones occupées par des cellules vides.

DÉTECTION DES SUBSTANCES DANGEREUSES PAR LES ABEILLES

Malheureusement, la construction de mines est simple et bon marché, de sorte que leur utilisation est très répandue. Il existe au moins 50 millions de mines non explosées dans le monde (2001) et plus de 20.000 victimes sont tuées ou mutilées chaque année dans 90 pays (2003), dont 30% d'enfants.¹¹⁵ Si, en théorie, ces dispositifs n'étaient plus produits aujourd'hui, il faudrait probablement au moins 400 ans pour sécuriser les champs de mines connus existants. La recherche de mines enterrées et de munitions non explosées est très dangereuse. Des chiens (*Canis familiaris*), des rats (comme le rat géant africain *Cricetomys gambianus*) et des détecteurs de métaux ont été utilisés pour rechercher ces engins, mais ils ne fonctionnent pas avec les explosifs plastiques. On a essayé d'utiliser le rat géant africain, un rongeur nocturne présent dans la majeure partie de l'Afrique, du Sénégal au Kenya et de l'Angola au Mozambique. C'est l'un des plus gros rongeurs du monde et il a été entraîné à la recherche de mines au Mozambique.¹²⁰ Les principaux avantages par rapport à l'utilisation de chiens sont un coût moindre, la possibilité de pénétrer facilement dans des sites où les chiens ne peuvent pas le faire et le fait que leur poids ne soit pas suffisant pour faire exploser les mines. Des animaux marins ont été utilisés pour rechercher des mines terrestres, comme les dauphins (utilisés en 2003 lors de l'invasion de l'Irak), les otaries et les orques.¹¹⁹

Des chercheurs ont étudié la possibilité d'utiliser l'odorat des abeilles pour détecter des substances dangereuses.^{116, 117, 118} Les abeilles sont capables de mesurer des substances gazeuses à des concentrations de parties par milliard¹ ou, dans certains cas, de parties par trillion, c'est-à-dire à des concentrations très faibles. Les abeilles détectent de très faibles concentrations d'explosifs (10 à 100 ppt) tels que le 2,4-dinitrotoluène (2,4-DNT), le trinitro-toluène (souvent abrégé en TNT) et la cyclotriméthylène-trinitroamine (ou RDX, cyclonite ou T4 ; c'est également la matière explosive du C4).^{122, 123, 124, 125} Les mines libèrent une petite fraction sous forme de gaz, qui peut être perçue par le système olfactif des abeilles. Selon certains scientifiques, les abeilles sont capables de percevoir 50 ppt de 2,4-DNT avec une probabilité de

¹ L'abréviation *ppb* signifie partie par milliard (*billion* est un préfixe du système international équivalent à 10¹²), c'est-à-dire qu'elle indique la présence d'une particule dans l'air pour chaque milliard d'autres particules; on utilise également les parties par billion ou *ppt*, un préfixe du système international équivalent à 10¹⁸.

moins de 2% de faux positifs ou de faux négatifs.¹²⁶ Lors d'essais expérimentaux sur le terrain, il a été possible de générer une congrégation d'abeilles au-dessus des mines.¹¹⁵ L'utilisation des abeilles en situation réelle pour la recherche de mines n'est probablement pas encore possible, car il existe de nombreuses limitations, comme celle de pouvoir suivre les abeilles dans un rayon de quelques kilomètres (des jumelles et une échelle ne suffisent pas).

Les abeilles sont conditionnées pour rechercher activement des odeurs particulières, comme celles de certains explosifs, et recevoir une récompense alimentaire.¹²⁰ Pour augmenter l'attention et la mémoire, les abeilles reçoivent des récompenses telles que de l'eau et du sucre additionné de caféine (celle-ci est naturellement présente dans le nectar et le pollen de certaines plantes des genres *Citrus* et *Coffea*).¹⁰⁷ Une solution de sucre et d'eau avec 25 ppm de caféine est plus attractive que le sucre seul, mais à 150 ppm la caféine génère une action répulsive (la caféine améliore la mémoire des abeilles).⁷¹⁸ En exploitant le réflexe pavlovien, on peut générer une congrégation d'abeilles là où une mine est enterrée. Les abeilles peuvent être forcées à entrer dans un petit récipient et dès qu'elles perçoivent une solution sucrée, elles tendent leur trompe pour se nourrir. Une fois l'abeille conditionnée, lorsqu'elle reçoit une certaine odeur, elle étend sa trompe même lorsque le stimulus olfactif connu n'est pas suivi de la récompense. Les abeilles peuvent également être conditionnées pour ne polliniser que certaines plantes.

Une punition, telle qu'un léger choc électrique, déclenche le réflexe d'extraction de la piqûre. Les abeilles peuvent apprendre qu'une odeur est récompensée et une autre punie.²⁵⁴ Ce processus d'apprentissage est rapide. Les colonies locales peuvent être utilisées pour conditionner les abeilles, en utilisant de la terre contaminée par la mine et une solution d'eau et de sucre, donc théoriquement c'est très simple et bon marché. On sait qu'une agence américaine (*Defense Advanced Research Agency*) a financé ce type de recherche et que plusieurs chercheurs universitaires ont exploré cette application, comme dans le cas de la recherche sur les mines en Croatie.^{116, 121}

Les chiens sont utilisés pour rechercher des substances dangereuses et interdites, telles que des explosifs et des drogues à l'intérieur de véhicules et de valises et, comme mentionné, la possibilité d'utiliser des abeilles conditionnées de manière appropriée (réflexe conditionné ou de Pavlov) à l'aide de prototypes (*Vasor136 ou Volatile Analysis by Specific Olfactory Recognition*) a été évaluée.^{3, 130, 131} Ces instruments exploitent le réflexe d'extension de la trompe des abeilles conditionnées pour associer une odeur spécifique à une récompense alimentaire (eau et sucre). Il suffit de quelques heures pour conditionner les abeilles et, grâce à un appareil qui aspire l'air, le réflexe obtenu à partir des molécules de l'air aspiré dans les valises, les voitures ou autres objets à contrôler est mesuré électroniquement et automatiquement. Cet instrument est doté d'un écran qui affiche le nombre d'extensions enregistrées par quelques dizaines d'abeilles (36 dans un modèle particulier ; les abeilles ouvrières qui ont ce réflexe le plus actif sont celles entre le douzième et le dix-huitième jour).¹³³ Un prototype annoncé sur Internet a la taille d'un aspirateur portable et abrite quelques dizaines d'abeilles, chacune étant équipée d'un capteur électronique automatique capable de détecter l'extension de la trompe. Les abeilles conditionnées peuvent effectuer ce travail pendant quelques heures et jusqu'à une semaine.¹¹⁵ En théorie, il serait possible de conditionner un plus grand nombre d'abeilles à différentes substances et donc, avec un seul échantillonneur, de mesurer la présence de différentes substances (par exemple, des explosifs et des drogues). Il existe des prototypes qui conditionnent 78 abeilles à percevoir 12 substances différentes.

S'il était possible d'utiliser ces insectes pour rechercher des munitions, à la place des chiens, il y aurait plusieurs avantages, comme la réduction des coûts. Les abeilles seraient conditionnées en quelques heures alors que les chiens seraient dressés en plusieurs mois, le poids des chiens serait suffisant pour activer les mines donc c'est très dangereux, les abeilles retourneraient à la ruche. Il est possible d'utiliser des abeilles locales, alors que l'utilisation et l'entretien de services avec des chiens entraînés sont beaucoup plus coûteux. Cependant, les

abeilles ne volent pas la nuit, par mauvais temps (pluie et vent) et si la température descend en dessous de 10°C. Pendant l'hiver, elles restent à l'intérieur de la ruche et commencent à voler lorsque, pendant plusieurs jours consécutifs, les températures dépassent 15°C.¹²⁹ Les abeilles peuvent aussi être distraites par les fleurs. Un prototype de système automatique de conditionnement des abeilles sur le terrain fonctionne à l'énergie solaire, est contrôlé à distance et peut distribuer des odeurs spéciales (par exemple, des explosifs) avec une récompense alimentaire (eau et sucre).^{4, 11, 16, 126, 128} De cette façon, les abeilles sont attirées vers une certaine zone et apprennent à rechercher une substance ou une odeur désirée ou des molécules particulières comme celles de certaines fleurs. L'exploitation du réflexe pavlovien peut encourager la recherche de certaines fleurs plutôt que d'autres. Des systèmes automatiques et portables peuvent être installés pour conditionner les abeilles sur le terrain.³ Ils peuvent fonctionner à l'énergie solaire, être contrôlés à distance et diffuser des odeurs particulières avec une récompense alimentaire (eau et sucre).^{4, 11, 16}

Le principal problème est de pouvoir suivre les abeilles pendant leur vol dans des situations réelles. Il existe des instruments (LIDAR) qui peuvent détecter les battements d'ailes des abeilles et mesurer les endroits où leur densité augmente.¹⁶ L'utilisation de systèmes radar (LIDAR ou *Light Detection and Ranging*) qui produisent une lumière laser est limitée à une portée de quelques centaines de mètres (1 km maximum, mais plus vraisemblablement moins de 150 m) et ne peut fonctionner qu'en l'absence d'obstacles et de barrières, sur un terrain non inondé et en l'absence de fumée ou de feu.^{3, 128} Le rayonnement produit par cet instrument est nocif pour les yeux humains.

Les antennes des abeilles sont capables de détecter dans l'air des substances provenant de cadavres (elles peuvent détecter des molécules telles que les cadavérines et les putrescines), de certains types de maladies (par exemple, les cancers de la peau et des poumons ou le diabète) et des micro-organismes présents dans les aliments (*Escherichia coli* et salmonelles).^{125, 131, 132} En théorie, plusieurs applications sont donc possibles.

ANTENNES ET DÉTECTEURS ÉLECTRONIQUES : BIOCAPTEURS

Les protéines du système olfactif des abeilles, en particulier sur les antennes, pourraient être utilisées pour construire des biocapteurs en raison de leur capacité à se lier à des substances telles que les drogues et les explosifs. Les substances qui pourraient être facilement détectées, même à de faibles concentrations, comprennent la cocaïne, les amphétamines, la méthadone, l'ecstasy et certaines substances présentes dans le cannabis, ainsi que des explosifs tels que le trinitrotoluène.¹⁵¹ À cet égard, on estime qu'environ 5% de la population adulte mondiale consomme des drogues interdites (2013) et qu'au moins 200.000 personnes par an meurent principalement d'héroïne et de cocaïne.¹⁵²

Au moins 177 gènes responsables de la reconnaissance des substances volatiles ont été identifiés chez les abeilles (*Apis mellifera* et *Apis cerana*). Ces gènes codent l'expression de protéines (au moins 43 ont été largement étudiées) qui ont pour fonction de percevoir les odeurs (par exemple, les phéromones). La première étape de la perception des odeurs est le lien entre la molécule gazeuse et les protéines situées dans les antennes de l'insecte. Cette liaison produit un stimulus électrique qui peut être mesuré à l'aide d'électrodes. Une application future possible serait de construire des dispositifs électroniques capables de mesurer et de quantifier les liens entre des molécules telles que l'héroïne et la cocaïne avec les récepteurs des antennes d'insectes tels que les abeilles (*Apis mellifera*) dans des instruments appelés biocapteurs. Des travaux scientifiques menés en Allemagne ont abouti à des prototypes utilisant des antennes d'abeilles reliées à des capteurs électroniques pour mesurer la concentration de médicaments dans l'air. Des électrodes

ont été utilisées pour mesurer les stimuli électriques produits par la fixation de substances sur les récepteurs des antennes des abeilles. Avec un système portable d'*électro-antenne-gramme*, il est théoriquement possible de mesurer également les stimuli perçus par les antennes d'autres insectes tels que la tordeuse des baies de raisin (*Lobesia botrana* qui est un lépidoptère tortueux, connu pour les graves dégâts qu'il cause en se nourrissant de baies de raisin) et la blatte siffleuse de Madagascar (*Gromphadorhina portentosa* qui est un insecte blatoïde appartenant à la famille des Blaberidae, endémique de Madagascar).¹⁵³ Ces insectes présentent certaines caractéristiques utiles : ils sont faciles à élever et ont une bonne capacité à sentir les substances volatiles. Leurs antennes peuvent être coupées et insérées dans des dispositifs électroniques portables spéciaux (*puces*). La réponse électrique aux substances odorantes dépend de la dose. Une étude a révélé que les antennes des abeilles sont les plus sensibles à la présence d'héroïne et de cocaïne, celles de la teigne à la présence de cannabis et celles de la blatte siffleuse de Madagascar à la présence d'amphétamines et de caféine (elle est utilisée pour couper certaines drogues).¹⁵² Les différentes capacités des insectes pourraient être utilisées dans des biocapteurs multiples, capables d'utiliser simultanément les signaux provenant des antennes de différentes espèces. On pourrait également utiliser des insectes vivants conditionnés et mesurer leurs réactions, comme décrit précédemment (*Vasor136*), dans des appareils spéciaux plus ou moins automatiques.¹³¹ Il pourrait donc être possible de construire des biocapteurs portables capables d'exploiter les dons naturels des insectes pour effectuer des mesures fiables et surveiller le commerce illégal de drogues mais aussi d'explosifs.¹²⁰

Il existe également de nouvelles applications des nanotechnologies qui permettent de lier les protéines individuelles des récepteurs olfactifs (non seulement des insectes, mais théoriquement de tout animal tel que les porcs et les chiens) à des nanotubes de *transistors* en carbone et de mesurer la présence de substances odorantes dans l'air à de faibles concentrations.¹⁵⁴ Dans cette hypothèse d'application biotechnologique, on n'utilise pas les antennes mais seulement les protéines qui s'y trouvent normalement. Il est possible de lier les protéines des récepteurs olfactifs à des *transistors* à nanotubes de carbone et de construire des dispositifs qui mesurent la liaison des molécules de gaz aux protéines du système olfactif (il s'agit d'interfaces biologiques microscopiques entre les protéines réceptrices membranaires et les nanotubes de carbone). Il est possible de construire une sorte de nez bio-électronique capable d'exploiter les récepteurs construits par la nature. Les nez bio-électroniques, s'ils sont correctement construits, peuvent fonctionner pendant plusieurs mois. À titre d'exemple, on rapporte que les protéines du récepteur olfactif de souris ont été utilisées pour tester la capacité à mesurer la présence de 8 molécules différentes dans l'air (par exemple, l'eugénol : il s'agit d'un liquide huileux, presque incolore ou jaune clair, qui est extrait de certaines huiles essentielles, notamment l'huile de clou de girofle et la cannelle ; il est utilisé en parfumerie).¹⁵⁶ La liaison entre l'odorant et la protéine génère une variation du courant électrique qui peut être mesurée. Ces protéines liées dans le biocapteur ont été capables de détecter la présence d'une substance qui n'existe pas dans la nature, mais qui est bien détectée par les souris comme l'explosif 2,4-dinitrotoluène (2,4-DNT).

Les abeilles produisent des substances organiques volatiles qui sont utilisées pour communiquer des messages au sein de la colonie. Pour remplir cette fonction, elles possèdent 15 glandes exocrines qui produisent diverses hormones, mais aussi de la cire, du venin, certaines enzymes (protéines) et les larves produisent de la soie. Les odeurs émises au sein de la colonie servent à communiquer de nombreuses informations et peuvent être utilisées artificiellement.⁴⁷⁰ Certains messages sont très importants, comme celui de la phéromone de la reine, qui consiste en fait en un mélange de 9 substances différentes qui favorisent l'agrégation et stimulent les soins de la reine par les abeilles ouvrières. Il est possible de construire des instruments spéciaux dans lesquels des équipements chimiques sophistiqués (chromatographie en phase gazeuse avec analyseur à ionisation de flamme) peuvent être combinés avec des capteurs qui mesurent l'activité des antennes des abeilles (biocapteurs). Il est ainsi possible de mesurer simultanément

les substances volatiles et l'activité électrique, générée par un ou plusieurs capteurs reliés à l'antenne de l'insecte, montée entre deux électrodes : un analyseur chimique est combiné à un analyseur biologique.⁴⁷⁰ Avec cette technique, il est possible de mesurer les stimuli produits par certaines substances chimiques qui peuvent avoir des fonctions différentes (par exemple, des répulsifs ou des attractifs).

En plus des antennes d'abeilles, d'autres parties du corps qui ont une activité sensorielle en réponse à des produits chimiques peuvent également être utilisées. Des capteurs biologiques artificiels peuvent être construits pour étudier la réactivité à des produits chimiques spécifiques qui peuvent se lier à un ou plusieurs récepteurs et stimuler une ou plusieurs cellules nerveuses. Dans ce type d'analyseur de stimulus chimique, on peut utiliser les antennes (analyseur chromatographique à électro-antenne), la tête ou le corps entier de l'insecte. Ces applications soulèvent des considérations éthiques qui ne sont pas abordées en détail.

MACHINES-INSECTES : ABEILLES CYBERNÉTIQUES

Dans la littérature scientifique, les *cyborgs* sont des organismes vivants dont certaines parties sont remplacées par des prothèses artificielles réalisées avec des systèmes cybernétiques (électroniques et mécaniques).¹¹⁹ On tente de mettre au point des technologies électroniques qui peuvent être implantées dans le système nerveux des abeilles (et d'autres insectes) pour essayer de contrôler leur comportement, comme le vol.¹³⁴ Certains projets (*hybrid insect micro electro mechanical system* ou *HI-MEMS*) ont été lancés par le ministère américain de la défense.^{118, 135, 136, 137} Ce département (par le biais de la Defense Advanced Research Project Agency ou DARPA) investit des millions de dollars dans des projets visant à générer des insectes *cyborgs* (abeilles, papillons de nuit, papillons, scarabées ou sauterelles). Une tentative intéressante de contrôler le vol du sphinx du tabac, un papillon (*Manduca sexta*), est rapportée dans la littérature scientifique.^{138, 139, 140} En 2008, lors d'une conférence, l'un des premiers exemples de mite-cyborg (*Manduca sexta*) a probablement été divulgué, dans lequel l'appareil électronique a été implanté au stade de chrysalide, de sorte qu'il a été intégré avec succès dans le corps pendant la métamorphose.¹¹⁹

À l'avenir, il sera possible de placer un microphone, un compteur de molécules de gaz et une caméra vidéo dans ces dispositifs micro-électroniques. Peut-être sera-t-il un jour possible de prendre des mesures, de rechercher des substances toxiques ou de prélever des échantillons en guidant artificiellement les insectes.

Chez les abeilles, on a tenté d'implanter des instruments électroniques dans la chrysalide, avant la métamorphose, afin que les adultes aient des tissus qui ont intégré ces composants dans l'exosquelette.¹¹⁵ Cette technique est également utilisée pour tenter d'implanter des systèmes de contrôle de position (*Global Positioning System*). Peut-être sera-t-il également possible d'essayer de faire ajouter volontairement des substances au venin des abeilles distribué par piqûre et d'utiliser leurs yeux au lieu de micro-caméras (*cybugs*). Sur ce point, il est intéressant de rappeler que les abeilles sont capables de percevoir les rayons ultraviolets et ne voient pas la couleur rouge.

Les chercheurs tentent de contrôler le vol et le mouvement des insectes en leur implantant des interfaces capables de stimuler artificiellement des zones nerveuses ou des muscles. Cette voie est préférée à celle des micro-drones volants car l'un des plus petits prototypes construits pèse 3 g, mesure 10 cm de long et peut voler pendant moins de trois minutes avant que les batteries ne s'épuisent (les batteries représentent au moins un tiers du poids mais ne peuvent assurer une autonomie utile).^{141, 145} En outre, ce petit robot doit être piloté par un technicien expérimenté. On peut affirmer que la meilleure micro-machine fabriquée par l'homme ne peut rivaliser avec les capacités de vol des insectes.

Il existe des systèmes sans fil qui peuvent tenter de contrôler le vol des insectes. Ces systèmes disposent de plusieurs électrodes, sont programmables, possèdent une mémoire et sont équipés d'un système radio contrôlé. Ils ne sont probablement que des prototypes de laboratoire, fonctionnent pendant moins de 30 minutes et jusqu'à quelques heures, et peuvent être utilisés sur une distance de 5 à 25 m entre l'équipement de contrôle et l'insecte. Un principe de fonctionnement consiste à implanter des électrodes dans les zones nerveuses (par exemple les lobes optiques de *Mecynorhina ugandensis*, une grande blatte africaine) qui régulent le début et la fin du déclenchement du vol.¹⁴¹ En stimulant différemment la zone gauche ou droite, on peut espérer réguler la direction du vol. Le mécanisme musculaire est complexe, nous essayons donc d'agir sur les zones nerveuses qui initient le vol afin qu'il soit contrôlé naturellement. Le vol d'un insecte est régulé par de nombreux muscles différents (plus de 13) qu'il est difficile de synchroniser artificiellement avec des stimuli électriques périphériques.¹⁴² Pendant le vol, l'abdomen et les jambes doivent également être synchronisés afin d'espérer une attitude stable. Un autre problème est celui de l'énergie. À l'avenir, ces instruments microélectroniques pourraient utiliser les sucres de l'hémolymphe des insectes comme source d'énergie, de sorte qu'ils n'auraient pas besoin de piles.

Pour stimuler artificiellement les muscles, en plus de devoir surmonter l'obstacle du synchronisme, il faut de l'énergie. En revanche, si on utilise le stimulus uniquement pour initier le vol autonome plutôt que de le stimuler continuellement, on économise de l'énergie. Dans le laboratoire, on peut démarrer le vol et le terminer, mais on ne peut probablement pas éviter un obstacle de manière guidée. Par exemple, dans des expériences sur des cafards, le vol peut être géré artificiellement pendant moins de 10 secondes.¹⁴² Les électrodes peuvent se détacher pendant le vol et causer d'autres problèmes. Pour contourner ce problème, on tente d'implanter des dispositifs électroniques dans les larves afin que les adultes aient intégré ces structures en leur sein, formant ainsi de véritables *cyborgs* (insectes-machines ou robots hybrides). À l'heure actuelle, il existe des tentatives qui ont donné quelques résultats dans le contrôle du vol des papillons de nuit et des coléoptères.

Il est également possible de penser à utiliser d'autres insectes, plus gros, qui pèsent jusqu'à 100 g et mesurent 20 cm de long et peuvent donc transporter des charges plus importantes.^{143, 144} Toutes les applications impliquant des animaux soulèvent des questions éthiques très importantes : les êtres vivants sont traités de la même manière que des machines ou des objets, et il est facile d'imaginer des applications négatives.^{145, 146}

Il sera probablement possible à l'avenir de dire aux abeilles dans quelle direction voler à l'aide de robots. De petits drones volants, qui pourraient remplacer les abeilles, sont également en cours d'essai, mais pour l'instant, ils sont probablement confinés aux laboratoires et aux rêves de science-fiction.¹⁵⁷

Une autre possibilité pour la détection des mines pourrait être la combinaison de drones et d'abeilles. Le premier drone pourrait placer un distributeur de conditionnement d'abeilles télécommandé sur le site d'essai. Un autre drone pourrait être équipé de caméras et de systèmes radar pour suivre ce que font les abeilles dans un rayon de quelques dizaines de mètres. Ce drone pourrait transporter des abeilles déjà conditionnées et équipées d'une antenne. Des dirigeables ou des hélicoptères radiocommandés pourraient être utilisés pour transporter des systèmes de biosurveillance des abeilles dans les airs et au sol.¹¹⁸ Probablement, vu son utilité, cela vaut la peine d'essayer.

Parmi les autres applications futures, citons l'étude du fonctionnement du cerveau d'insectes tels que les abeilles et les fourmis, afin de construire des intelligences artificielles (électroniques) capables de guider des drones et des robots. Le cerveau d'une abeille mesure environ un millimètre cube et se compose de 960.000 neurones (plus de 100.000 fois plus petit que le cerveau humain).³⁵ La recherche scientifique s'attache à concevoir des yeux et des cerveaux artificiels qui, grâce à des circuits électroniques et des programmes informatiques, se

comportent comme le cerveau des insectes. ^{197, 207, 209} De cette façon, ces robots pourraient s'orienter de manière autonome sans l'aide du GPS (*Global Positioning System*).

LES APPLICATIONS MILITAIRES DE L'APICULTURE

Les traces de l'application militaire des abeilles remontent à plus de 2000 ans, lorsqu'elles étaient utilisées pour défendre des positions fortifiées. Il est probable que l'utilisation des abeilles pour se défendre contre les ennemis est une pratique encore plus ancienne, car il existe des hiéroglyphes égyptiens qui témoignent de cette application. ² Dans le passé, des armes spéciales ont été construites pour lancer ces insectes : par exemple, au Nigeria, des canons spéciaux ont été construits à cette fin et les Mayas ont produit une sorte de grenade à main pour lancer les abeilles. ²

Un traité de 400 avant J.-C. sur la survie en cas de siège recommandait de lâcher des abeilles dans les tunnels creusés par les ennemis au pied des fortifications. ¹¹⁵ La défense navale de l'Empire gréco-romain pouvait également avoir des abeilles dans son arsenal, car elles constituaient un système de défense contre les navires catapultés depuis le rivage (en 332 avant J.-C.).

Au premier siècle avant Jésus-Christ, le miel toxique était utilisé en Turquie pour empoisonner les soldats ennemis. ⁹⁷² Entre le 3^e et le 4^e siècle de notre ère, les Romains ont également utilisé des ruches à bombes, lancées sur leurs adversaires, comme technique militaire. Les Romains catapultaient les ruches dans les murs des fortifications. En 908, les Anglais ont réussi à se défendre contre le siège des Danois et des Norvégiens en lâchant également des abeilles dans les tunnels. Les essaims d'abeilles lancés vers les ennemis, grâce à leurs piqûres, génèrent peur et ravages. Les abeilles ont également été utilisées pour faire des ravages dans la cavalerie (en 939 en Allemagne). ¹¹⁵ Dans les années 1100, les prisonniers nus pouvaient être aspergés de miel et soumis à des piqûres d'abeilles comme méthode de torture.

Pendant la Première Guerre mondiale, les Allemands ont utilisé des ruches pour retarder l'avancée des troupes britanniques. Pendant l'occupation italienne de l'Éthiopie, la population locale a jeté des abeilles dans les chars (1935-1936). La même technique a été utilisée au Vietnam contre les chars américains.

Les plantes peuvent produire moins d'un millionième de litre et jusqu'à des milliers de millionièmes de litre de nectar par fleur, la teneur en sucre pouvant varier entre 7% et 70%. ⁷⁶⁴ Le contenu en nectar des fleurs varie donc considérablement, et comme il s'agit d'une ressource limitée, les insectes se font concurrence. Le nectar de certaines plantes peut donner naissance à un miel toxique et, dans de rares cas, mortel. ¹⁴⁸ Cette possibilité a été exploitée pour une autre application dans le passé : l'utilisation du miel produit à partir d'espèces végétales vénéneuses, qui est toxique pour l'homme. Les plantes peuvent produire soit du pollen, soit du nectar, soit les deux, qui sont toxiques pour les abeilles. Dans certains cas, les effets néfastes se manifestent dans le miel.

Les graianotoxines sont un groupe de toxines produites par les rhododendrons et d'autres plantes de la famille des *Ericaceae* (par exemple, le laurier des montagnes ou *Kalmia latifolia* que l'on trouve en Amérique du Nord). Le miel fabriqué à partir de ce nectar provoque une réaction très rare appelée empoisonnement à la graianotoxine, empoisonnement au miel ou empoisonnement au rhododendron. ¹⁴⁹ Un dossier sur cette stratégie révèle qu'elle a été utilisée pour empoisonner 5.000 soldats en 946 après Jésus-Christ, par une femme qui a ainsi vengé le meurtre de son fils. ¹¹⁵ Cependant, ce type d'intoxication a probablement été enregistré dès 401 avant Jésus-Christ. Certains des symptômes sont des nausées, des vomissements, une salivation excessive, des vertiges et même des phénomènes plus graves comme des complications cardiaques et un bloc cardiaque (chez 42 personnes intoxiquées enregistrées en Turquie). ¹⁴⁸

Le miel de rhododendrons (*Rhododendrum ponticum* et *Rhododendrum luteum*) provoquait de graves intoxications à l'époque grecque. Ces intoxications ne sont pas mortelles et ont été récemment enregistrées dans les régions de la mer Noire à cause de plantes contenant des substances terpéniques appelées andromedotoxines ou graianotoxines.³⁵ Dans certains pays (Turquie et Caucase), le miel obtenu, appelé *miel fou*, est utilisé en petites quantités car il est considéré comme utile contre les douleurs abdominales et comme aphrodisiaque. *Rhododendrum ponticum* est devenu une espèce envahissante dans certains pays, comme le Royaume-Uni.

Une autre plante qui peut produire un miel dangereux est le senecio sud-africain (*Senecio inaequidens* de la famille des astéracées). Cette plante peut produire des substances (alcaloïdes) qui sont hépatotoxiques et cancérogènes. Les plantes de la famille des Daphnaceae (*Daphne mezereum* et *Daphne gnidium*) sont également toxiques et peuvent produire un miel dangereux. Les boutons d'or sont capables de produire une autre substance toxique (l'anémone générée par *Ranunculus ficaria* et le genre *Delphinium*).³⁵ Le miellat produit par un insecte phytophage (Hemipterus phulgoroides *Scolypopa australis*) qui est un ravageur d'un arbuste en Nouvelle-Zélande (*Coriaria arborea*) est également dangereux.⁹⁷⁴

Voici quelques plantes qui peuvent produire un nectar dont le miel peut être toxique pour l'homme :

- *Aesculus californica* ;
- *Andromède* contient des graianotoxines qui sont psychoactives et toxiques (elles peuvent paralyser le système limbique et le diaphragme) ;
- *Belladonna* ;
- *Datura* présent au Mexique et en Hongrie ;
- *Hyoscyamus niger* (jusquiame noire) qui est une plante herbacée toxique ;
- *Kalmia latifolia* et *Gelsemium sempervirens* présents en Amérique ;
- *Melicopeternata* et *Coriariaarborea* présents en Nouvelle-Zélande ;
- *Nerium oleander* (lauriers-roses) dans la région méditerranéenne ;
- *Rhododendron ponticum* (*Azalea pontica*) contient des alcaloïdes qui sont toxiques pour l'homme (dans les fleurs) ;
- *Serjanialethalis* présent au Brésil.

Une autre application militaire possible, probablement aussi utilisée récemment, repose sur le principe d'espérer nuire à la santé des abeilles afin de réduire l'autosuffisance alimentaire d'une zone. L'endommagement du service de pollinisation réduit la production agricole. La dissémination des colonies malades favorise la propagation des parasites qui tuent les abeilles. Le peuple cubain a accusé les Américains d'avoir délibérément introduit des colonies malades dans ce but.²

En conclusion, les abeilles sont utilisées dans des stratégies offensives et défensives depuis plus de 2000 ans et constituent probablement l'une des plus anciennes armes biologiques utilisées par l'homme.

INTRODUCTION À LA BIOSURVEILLANCE

LES AVANTAGES DE LA BIOSURVEILLANCE

Les indicateurs chimiques, tels que les concentrations de polluants et de nutriments, ou les indicateurs biologiques peuvent être utilisés pour vérifier les caractéristiques écologiques d'un environnement. Les techniques de chimie analytique permettent de mesurer les polluants dans différentes matrices environnementales mais présentent certains inconvénients :

- 1) Les activités anthropiques distribuent quotidiennement des dizaines de milliers de molécules chimiques différentes dans l'environnement, et il est impossible de fonder un système de gestion, de prévention et de surveillance de la santé de la biosphère sur la mesure des concentrations d'un si grand nombre de substances dans différentes matrices telles que l'eau, le sol, l'air et les organismes vivants. Il s'agit d'une stratégie inefficace dont les coûts sont insoutenables.
- 2) Les produits chimiques sont transformés par l'eau, la lumière, les réactions chimiques dans le sol, avec les micro-organismes ou dans les tissus animaux et végétaux. Le choix de la matrice où chercher une molécule doit être fait avec soin car les substances dangereuses peuvent être difficiles à trouver dans certaines matrices. Les produits de la transformation, qui sont souvent inconnus, peuvent être nombreux et plus dangereux que les substances de départ. Par conséquent, certaines substances très dangereuses restent dans l'environnement pendant une courte période et deviennent analytiquement invisibles, mais cela ne signifie pas que nous ne devons pas nous inquiéter. Les métabolites de nombreux pesticides se sont révélés plus persistants et plus dangereux que les molécules de départ. Identifier même les métabolites des molécules dangereuses est coûteux et matériellement impossible dans la plupart des cas, en partie parce que beaucoup de ces produits de réactions biochimiques sont inconnus.
- 3) Dans certains cas, les matrices environnementales n'ont pas de mémoire. Par exemple, le rejet de polluants dans les eaux de surface, en raison des effets de dilution et d'écoulement, peut ne pas être détecté par des déterminations analytiques après un certain temps, mais la bioaccumulation ou les effets létaux sur certaines espèces peuvent être détectés longtemps après. Certains produits chimiques se distribuent préférentiellement dans certaines matrices en raison de leurs caractéristiques chimiques et physiques. Par exemple, l'herbicide alachlore, qui est utilisé dans la culture du maïs, est très soluble, de sorte qu'il est facile de le trouver dans l'eau des rivières (par exemple, dans les rivières de la région des Marches).⁸⁷⁰
- 4) Les déterminations analytiques ne mesurent pas les effets additifs, synergiques, sublétaux, inhibiteurs ou promoteurs. Dans certains cas, les molécules (par exemple les médicaments humains ou zootechniques) qui contaminent l'eau génèrent, à de très faibles concentrations, l'hermaphrodisme, la féminisation, des anomalies de la reproduction chez les poissons et l'immunosuppression chez les moules. Ainsi, la mesure de ces anomalies très évidentes peut indirectement fournir des informations sur les graves déséquilibres anthropiques provenant de molécules difficiles à déterminer.

Étant donné que les différents contaminants présents dans l'environnement peuvent agir en synergie et se bioaccumuler, amplifiant ainsi les effets négatifs sur les organismes vivants, afin d'avoir une image synthétique et plus représentative de la dégradation de l'environnement d'une zone, il convient d'accompagner les méthodes d'investigation instrumentales courantes d'autres méthodes biologiques, c'est-à-dire basées sur l'utilisation d'organismes vivants capables d'agir comme indicateurs du niveau de pollution. Les indicateurs biologiques peuvent fournir un grand nombre d'informations simplement en mesurant la biodiversité et l'abondance des espèces individuelles. La présence d'organismes en position terminale de la chaîne alimentaire est un premier indicateur de la santé du réseau trophique. Certains organismes, en raison de leur biologie, se prêtent à la mesure des altérations dans certains écosystèmes (par exemple, les rivières plutôt que les mers), tandis que d'autres sont connus pour être sensibles à certains polluants ou pour les bioaccumuler à des concentrations élevées. Ces évaluations, tant qualitatives (biodiversité et complexité d'un écosystème) que quantitatives (numération : par exemple, de la biomasse microbienne dans le sol), sont capables de fournir des informations avec des coûts et des équipements beaucoup moins onéreux. Le phénomène bien connu de la bioaccumulation des contaminants dans les tissus des êtres vivants facilite la mesure des indicateurs d'alerte qui peuvent parfois être stockés dans les êtres vivants à des concentrations même plus de 1.000 fois supérieures à celles de l'eau, de l'air ou du sol. Une autre approche méthodologique est également possible en laboratoire : la matrice environnementale peut être utilisée pour mesurer les effets létaux et sublétaux sur des êtres vivants choisis comme modèle. Les truites peuvent être utilisées pour évaluer les effets de l'eau contaminée ou des échantillons de sol pollué peuvent être utilisés pour évaluer les effets inhibiteurs ou létaux sur la germination des plantes (ce test est utilisé pour mesurer la toxicité du compost issu des déchets municipaux).

741

La biosurveillance par l'examen de l'état de santé des êtres vivants dans un écosystème donné (agricole, rural, urbain ou sauvage) présente certains avantages : ⁴³

- a) Elle est capable de fournir des informations spatiales et temporelles plus significatives.
- b) Plusieurs organismes peuvent être particulièrement sensibles à certains polluants, comme les abeilles aux insecticides et certaines plantes aux herbicides. A titre d'exemple, les bourdons (*Bombus terrestris*) sont 7 fois moins sensibles aux effets de contact de certains insecticides que les abeilles (*Apis mellifera*) et, à l'inverse, ces dernières se sont révélées 2 à 3 fois plus résistantes à trois insecticides (néonicotinoïdes), compte tenu de la différence de poids. ⁴⁵
- c) Les animaux et les plantes peuvent se bioaccumuler, fournissant ainsi des informations sur une contamination survenue il y a longtemps : par exemple, la cire des abeilles domestiques accumule les pesticides utilisés dans l'agriculture et par les apiculteurs. En outre, le phénomène de bioaccumulation signifie qu'il est plus facile de mesurer la présence de certaines substances, car elles peuvent être présentes dans les tissus animaux et végétaux à des concentrations plus élevées que celles qui peuvent être mesurées, par exemple, dans l'air ou l'eau.
- d) Les animaux tels que les insectes (par exemple les abeilles) peuvent subir des effets additifs et synergiques (par exemple en matière de comportement et de capacité de reproduction) qui ne sont pas détectés par des tests tels que ceux appliqués par les fabricants avant la mise sur le marché de substances telles que les pesticides.
- e) Les animaux tels que les abeilles inspectent naturellement de grandes surfaces, ce qui en fait une méthode économique d'échantillonnage biologique.

Certains organismes ont été largement utilisés comme indicateurs de la contamination des sols et des eaux, tels que les acariens, les nématodes, les collemboles, les isopodes, les insectes et les

mollusques. La contamination par les métaux a été contrôlée avec des champignons, des mousses, des lichens et dans l'eau avec des poissons et des mollusques.⁶⁴

De nombreux organismes ont été utilisés comme bioindicateurs de la contamination par les HAP, comme les poissons et les mollusques pour le milieu aquatique, et les mousses et les conifères pour le milieu terrestre (les hydrocarbures aromatiques polycycliques sont générés par la combustion et sont très dangereux car ils peuvent être cancérigènes).⁵⁹ Les HAP peuvent être absorbés par les conifères à partir de l'air, du sol et de l'eau (les jeunes aiguilles de pin ont été utilisées comme bio-indicateurs). Il est possible de faire un bref résumé, non exhaustif, des différentes matrices biologiques utilisées par les études et les recherches pour détecter certains types de contamination :^{43, 181, 870}

- Le lait de vache pour les métaux et les dioxines.
- Poils de mouton et de chèvre pour les métaux.
- Tissu adipeux et muscle de porc pour l'insecticide DDT (ou para-dichlorodiphényltrichloroéthane) et autres insecticides organochlorés.²⁴⁸
- Les lichens pour certains polluants atmosphériques (dioxyde de soufre ou SO₂).
- Feuilles de tabac pour l'ozone troposphérique (O₃).
- Aiguilles de pin ou feuilles de chêne vert pour les métaux et les dioxines.
- La viabilité du pollen tel que celui du *Pinus nigra* fournit une indication du niveau d'exposition aux polluants environnementaux tels que le dioxyde d'azote (NO₂). La pollution atmosphérique réduit la viabilité du pollen et donc sa fonctionnalité.
- Mousses pour les métaux (y compris les radionucléides), les dioxines et les hydrocarbures aromatiques polycycliques.
- Des nématodes pour mesurer la santé des sols.
- Œufs et foie de poule pour les biphényles polychlorés et les dioxines.
- Des abeilles mortes à cause des insecticides.
- Fourmis (*Crematogaster scutellaris*) pour évaluer le niveau de contamination par les métaux (cadmium ou Cd, plomb ou Pb, nickel ou Ni, manganèse ou Mn).
- Moules (*Mytilus galloprovincialis*) pour les hydrocarbures aromatiques polycycliques et les métaux dans l'eau salée.
- Les anguilles (*Anguilla anguilla*) pour les métaux, les hydrocarbures aromatiques polycycliques et les pesticides organochlorés (ce sont des polluants organiques persistants) dans l'eau.
- Le mulot (*Mugil cephalus*) pour surveiller la présence de l'insecticide DDT et des biphényles polychlorés sur les côtes et dans les estuaires.¹⁸³ Les grands mammifères marins tels que les orques comptent parmi les animaux les plus contaminés par les biphényles polychlorés (ou PCB) de la planète.⁹⁷⁷ Les PCB sont présents dans le lard et les œufs des tortues (*Chelydra serpentina*) et sont soupçonnés de provoquer des altérations de la différenciation sexuelle.⁹⁷⁸
- La truite commune (*Salmo trutta*) pour surveiller les métaux dans l'eau douce.
- L'urine humaine pour certains herbicides (par exemple le glyphosate qui est un herbicide commercialisé dans plus de 750 formulations différentes), les insecticides organophosphorés (chlorpyrifos) et le lait maternel pour certains organochlorés. Le glyphosate est classé par le Centre international de recherche sur le cancer comme cancérigène potentiel (il est génotoxique) et agit comme un perturbateur endocrinien à très faible dose : moins d'un millième de gramme.^{196, 507} Il convient de rappeler que la plupart des aliments utilisés dans les fermes sont composés de maïs, de soja et de colza génétiquement modifiés pour être résistants au glyphosate. C'est sans doute l'une des raisons pour lesquelles le marché mondial du glyphosate représente plus de 8 milliards de dollars par an et qu'en 2012, 718.600 tonnes de glyphosate ont été vendues, soit plus de 100 g pour

chaque habitant de la planète. Ainsi, les chaînes alimentaires végétales puis animales sont dangereusement contaminées par ces molécules.

Dans de nombreux cas, la simple observation de la présence ou de l'absence, du nombre, du comportement et de l'état de santé de certains organismes (par exemple, les insectes) fournit des informations sur les conséquences des activités anthropiques à un coût très faible. Ce type d'approche peut être beaucoup plus rentable, fournir plus d'informations et enregistrer des conséquences que les mesures analytiques ne peuvent fournir, comme les effets additifs, synergiques ou inhibiteurs.

BIOMARQUEURS DE L'EXPOSITION AUX PESTICIDES CHEZ L'HOMME

Les pesticides (par exemple, les insecticides et les acaricides) sont très nocifs pour les abeilles mais aussi pour les humains : certains des effets des pesticides sont des irritations cutanées, des malformations congénitales, des modifications génétiques, des tumeurs, des dysfonctionnements nerveux, des perturbations endocriniennes, le coma et la mort. Certains pesticides tels que l'aldrine, le chlordane, le DDT, le dièdre, l'endrine, l'heptachlore, l'hexachlorobenzène, le mirex et le toxaphène sont considérés comme des polluants organiques persistants (POP).^{41, 181, 183} Cette catégorie (POP) peut altérer les systèmes endocrinien, reproducteur et immunitaire. L'exposition chronique à ces molécules peut entraîner le cancer, l'infertilité et des problèmes nerveux. Ces substances peuvent se bioaccumuler dans la chaîne alimentaire et entrer dans les cycles biochimiques de la biosphère. Malheureusement, nous continuons à produire et à utiliser ces molécules en grande quantité, même si nous sommes conscients de leurs effets négatifs.

De nombreuses études montrent que l'homme peut être utilisé pour la biosurveillance de la présence de pesticides dans l'environnement et d'une éventuelle exposition professionnelle. Certaines molécules peuvent être retrouvées dans le sang (organochlorés et leurs métabolites comme le DDT), dans l'urine (organo-phosphorés et glyphosate), dans les cheveux (organo-phosphorés), dans le lait maternel (organochlorés), dans le cordon ombilical.⁴⁶⁴ Tout au long de notre vie, nous sommes exposés à une énorme multitude de substances dangereuses. Par exemple, nous ingérons des plastiques avec notre consommation d'eau, et des centaines de substances telles que plus de 300 composés industriels (arsenic, solvants de nettoyage à sec, benzène, produits pharmaceutiques et dérivés), au moins une centaine de pesticides et d'engrais (résultats d'analyses d'eau potable effectuées entre 2004 et 2009 aux États-Unis).⁹⁸⁸ Pour la plupart des substances que nous rejetons dans l'environnement et que nous pouvons également consommer par le biais de l'eau, nous ne disposons pas d'informations suffisantes sur leur dangerosité et il n'existe pas de limites aux concentrations tolérables.

La biosurveillance peut être utilisée pour évaluer l'exposition professionnelle par des analyses d'urine et de sang ou par la mesure des dommages à l'ADN et de la variation des protéines. La surveillance biologique de l'exposition est également très importante pour déterminer les niveaux de substances qui peuvent être tolérés en dessous de seuils prédéterminés. Ces études fournissent des indications utiles pour la réglementation des concentrations maximales tolérables dans l'eau et les aliments et l'estimation des niveaux d'exposition professionnelle acceptables.

Plusieurs stratégies peuvent être utilisées pour mettre en œuvre la biosurveillance. Les biomarqueurs d'exposition, tels que les concentrations de substances étrangères et de leurs métabolites dans l'organisme, peuvent être étudiés. Il est possible de mesurer les concentrations de molécules dans le sang, l'urine, les cheveux et l'air expiré.

La mesure des biomarqueurs d'exposition permet d'évaluer les différences entre les personnes non exposées, l'exposition environnementale diffuse et l'exposition professionnelle. Dans certains pays, la surveillance par biosurveillance est obligatoire pour les groupes professionnels à risque particulier (par exemple, en Allemagne, les insecticides organochlorés sont recherchés dans le sérum sanguin ou au Japon, les solvants sont recherchés chez les travailleurs exposés).
489

Les animaux d'élevage peuvent également être utilisés. Pour mesurer l'exposition aux métaux (par exemple le cadmium ou Cd, le plomb ou Pb) ou aux insecticides organochlorés, on peut effectuer des mesures des concentrations dans le sang des bovins.

Il existe plusieurs directives nationales et internationales sur les concentrations maximales des biomarqueurs d'exposition professionnelle.⁴⁸⁹ Les limites de cette stratégie sont le coût et la difficulté d'examiner des milliers de polluants potentiels. À titre de référence, en 2005, 620 ingrédients actifs de pesticides étaient enregistrés aux États-Unis et commercialisés dans plus de 20.000 formulations, c'est-à-dire des mélanges avec des centaines d'autres substances. De nombreuses études ont été menées et fournissent des indications utiles : malheureusement, certains humains, comme ceux exposés professionnellement, ont servi de cobayes.

Les biomarqueurs de l'exposition professionnelle comprennent, sans s'y limiter, les éléments suivants :^{489, 517, 987}

- Lindane, plomb, monoxyde de carbone dans le sang.
- Méthylmercure dans les cheveux. La concentration accrue de ce métal dans les cheveux est une conséquence de la consommation accrue de poissons marins contaminés (l'espadon peut contenir 1.212 µg/kg, le bar, le thon ou la dorade plus de 200 µg/kg).
- Cadmium, métabolites d'insecticides organo-phosphorés, certains herbicides (par exemple 2,4-D, atrazines et leurs métabolites dans l'urine tels que la dééthyl-atrazine, qui est un métabolite des atrazines, et le 3,5,6-trichloro-2-pyridinol qui est un métabolite des organo-phosphorés), certains hydrocarbures aromatiques polycycliques, certains composés organiques volatils (par exemple benzène, n-hexane, toluène, xylène, styrène), l'acide formique, le nickel et le mercure dans l'urine. Les concentrations de certains composés organiques volatils peuvent être 10 fois plus élevées dans le sang que dans l'urine.
- Certains hydrocarbures aromatiques polycycliques dans les selles ou les urines.
- Les pesticides organochlorés et les dioxines dans le lait maternel.
- les insecticides organochlorés dans le sang.

Certains de ces marqueurs peuvent donner des informations sur les expositions chroniques aux insecticides organochlorés (même celles qui ont eu lieu des mois auparavant).

Le fait de vivre à proximité de vergers de pommiers (dans le Val di Non, province de Trente, Italie) augmente la concentration de métabolites de pesticides dans l'urine, avec des pics pendant la période de traitement en mai et juin (par exemple, les métabolites du chlorpyrifos éthyl, un insecticide organophosphoré).⁴⁸⁷ Les résidents proches des vergers de pommiers sont exposés aux pesticides tels que les insecticides et les fongicides. À l'intérieur de la maison, divers pesticides tels que le bromopropylate (acaricide), l'iprodione (fongicide), le boscalid (fongicide) se retrouvent dans la poussière ; le chlorpyrifos éthyl (insecticide), le difenocolazole (fongicide), le méthoxyfénazide (insecticide) se retrouvent dans la poussière en suspension dans l'air. Cette exposition a été associée à une réduction de la capacité à réparer l'ADN. Les enfants résidant pendant de longues périodes dans des zones agricoles subissent davantage de dommages à l'ADN, ce qui peut favoriser l'apparition de maladies telles que le cancer ; même les molécules qui ne sont pas cancérogènes peuvent favoriser indirectement le cancer, par exemple en endommageant les mitochondries ou en altérant la capacité de défense contre les dommages à l'ADN. L'exposition à de faibles doses de pesticides, même s'ils ne sont pas

cancérogènes, peut favoriser l'altération de fonctions physiologiques susceptibles de favoriser la cancérogenèse. Ces études montrent que l'homme peut être un bio-indicateur utile de la contamination de l'environnement, par exemple en détectant certains pesticides et leurs métabolites dans l'urine (par exemple, les insecticides et herbicides organophosphorés).

Une biosurveillance de la présence d'organophosphates a été réalisée à partir de l'urine de 195 enfants italiens âgés de 6 et 7 ans (53% de l'échantillon étaient des filles), et de 124 adultes (vivant à Sienne, en Toscane).⁴⁸⁸ Des métabolites ont été retrouvés dans toutes les urines testées : le métabolite diméthyl-phosphate dans 96% des échantillons et le métabolite diméthylthiophosphate dans 94% des échantillons. Les six métabolites trouvés dans l'urine peuvent être générés par différents types de pesticides tels que : azinphos-méthyle, azinphos-éthyle, diméthoate, chlorpyrifos, chlorpyrifos-méthyle, fénitrothion, chlorfenvinphos, dichlorvos et autres.⁴⁸⁸

Il est important de remarquer qu'un métabolite peut provenir de plusieurs pesticides, de sorte que certaines substances peuvent être des biomarqueurs utiles de l'exposition. Dans cette étude italienne, aucune famille n'avait utilisé ces insecticides. Dans l'urine des enfants, la présence de métabolites était significativement plus élevée que chez les adultes.⁴⁸⁸ La présence plus élevée de ces molécules dans l'urine des enfants peut probablement s'expliquer par l'exposition plus importante due à l'ingestion de poussières et de sol (12 fois plus élevée que chez les adultes) et l'exposition plus élevée via l'alimentation, par rapport au poids corporel.⁴⁸⁸ Des recherches menées aux États-Unis ont révélé que les enfants vivant dans des zones agricoles où des pesticides sont utilisés dans les vergers (tels que l'azinphos-méthyl, le chlorpyrifos, le parathion, le phosmet) sont exposés à des concentrations élevées dans la poussière. La poussière domestique présentait des concentrations plus élevées que la poussière du sol : la concentration maximale dans la poussière domestique était de 14.000 ng/g, alors qu'elle était de 930 ng/g dans le sol des vergers traités.⁴⁸⁸ Un aspect intéressant, mis en évidence par les auteurs de cette recherche, est que dans les études précédentes, il semble que la biosurveillance avec les humains n'ait pas donné de résultats positifs parce que les limites de détection des concentrations étaient beaucoup plus élevées. Dans ce travail, des méthodes d'analyse capables de détecter des concentrations de 0,01 µg/L ont été utilisées, alors que les travaux précédents mesuraient jusqu'à 20 µg/L - une concentration 2.000 fois plus élevée. Si l'on élimine dans ce travail les échantillons dont la concentration en métabolites est inférieure à 20 µg/L, moins d'un tiers sont positifs.⁴⁸⁸ Ainsi, la méthode d'analyse utilisée peut faire une grande différence dans la mesure où elle permet de mesurer de petites doses qui ont quand même des effets physiologiques, et qui sont des indicateurs très utiles de l'exposition et du risque.

Dans l'environnement domestique, le chlorpyrifos est l'insecticide le plus utilisé aux États-Unis : chez les enfants âgés de 3 à 6 ans, on peut considérer que l'exposition non liée à l'alimentation est d'environ 208 µg/kg de poids corporel par jour et jusqu'à 356 µg/kg de poids corporel par jour.⁴⁸⁸ Des métabolites d'organophosphates ont également été trouvés dans 80% des échantillons d'urine de 1.000 adultes allemands représentatifs de la population générale et donc non exposés professionnellement.⁴⁸⁹

Ainsi, l'urine peut être utilisée pour évaluer l'exposition aux insecticides organophosphorés chez les enfants, par exemple. Les humains peuvent se servir d'eux-mêmes pour surveiller le comportement d'autres humains et prévoir les effets sur la santé. Pour certaines molécules, la surveillance des urines est plus sensible que celle de la poussière, de l'eau et des aliments. Les avantages de la biosurveillance environnementale à l'aide de l'urine comprennent le fait que la contamination environnementale diffuse peut être mesurée, que les expositions chroniques et la bioaccumulation peuvent être mesurées et que les concentrations élevées supérieures au seuil de détection analytique peuvent être plus facilement détectées. En outre, comme les mêmes métabolites peuvent être produits par différents pesticides, il est plus facile d'atteindre des concentrations supérieures au seuil de détection et d'obtenir des informations sur les effets

additifs, c'est-à-dire la bioaccumulation globale à partir de la contamination environnementale et alimentaire à laquelle on est exposé.

Une autre catégorie de biomarqueurs d'exposition sont les biomarqueurs d'effet, c'est-à-dire ceux qui permettent de quantifier les changements physiologiques, biochimiques ou comportementaux produits par la présence d'interférents. Ils sont souvent le signe avant-coureur de certaines maladies. Cette stratégie mesure les changements dans les défenses immunitaires, dans la capacité à détoxifier certaines substances ou à les transformer en substances plus toxiques. Des biomarqueurs spécifiques ont été identifiés pour les reins, le foie, le système nerveux central et d'autres fonctions physiologiques importantes.⁴⁸⁹ Par exemple, les pyréthrinoïdes (insecticides tels que la perméthrine) génèrent un stress oxydatif en altérant la fonction de certaines enzymes et du système de détoxification appelé cytochrome P450.⁵²⁷ Malheureusement, les abeilles sont moins bien équipées en systèmes de détoxification que les autres insectes. Il est également possible de tester les effets mutagènes de l'urine, par exemple celle de personnes exposées à des hydrocarbures aromatiques polycycliques, dans des modèles expérimentaux en laboratoire (test d'Ames). Certains biomarqueurs de ces effets sont :^{489, 517}

- Mesure de l'activité acétylcholinestérasique dans les globules rouges. Après une exposition à des insecticides organophosphorés, l'activité de cette enzyme est réduite : des expositions survenues jusqu'à 3 ou 4 mois auparavant peuvent être évaluées.
- Muqueuse buccale et cellules dans l'urine pour mesurer les dommages causés à l'ADN (par exemple, pour mesurer les composés associés au cancer de la vessie).

Ces types d'altérations montrent des signes de toxicité à large spectre.

Les biomarqueurs de susceptibilité à certaines substances peuvent être mesurés, par exemple, par le biais d'enquêtes génétiques. Les biomarqueurs d'exposition sont les plus utilisés, tandis que les enquêtes génétiques peuvent soulever des questions éthiques inacceptables (par exemple, dans le cas d'une exposition professionnelle). Certaines protéines (enzymes) peuvent jouer un rôle très important dans la détoxification de certains pesticides. Les caractéristiques génétiques des mères peuvent augmenter la probabilité d'une atteinte du développement nerveux chez leurs enfants.⁵¹⁰ Par exemple, l'enzyme paraxonase (PON1) est impliquée dans la dégradation des insecticides organophosphorés. Certaines formes de ces protéines, issues de variables génétiques, peuvent accroître les effets toxiques de ces pesticides et affecter le développement neurologique des enfants d'âge scolaire. Chez les femmes enceintes, des concentrations réduites de cette enzyme (PON1) ou la présence de variations génétiques qui la rendent moins active dans la détoxification des insecticides organophosphorés, augmentent la susceptibilité de leur progéniture à la neurotoxicité.⁵¹⁰ Les différentes caractéristiques génétiques, dans ce cas, peuvent augmenter ou diminuer la susceptibilité aux dommages du système nerveux des enfants, générés par l'exposition des mères aux insecticides organophosphorés. La déficience du système de détoxification chez la mère expose l'enfant à des molécules toxiques pendant la grossesse et l'allaitement. En outre, ce système de détoxification chez les enfants n'est pas fonctionnel avant l'âge de 7 ans, de sorte que l'exposition environnementale des enfants peut également être plus dangereuse que celle des adultes. En âge scolaire, en raison de ces caractéristiques génétiques des mères exposées aux insecticides organophosphorés, on observe une augmentation des troubles de l'attention et des *déficits* cognitifs (QI réduit).⁵¹⁰

L'UTILISATION DES ABEILLES COMME BIO-INDICATEURS

Les abeilles (*Apis mellifera*) sont le principal pollinisateur de nombreuses espèces végétales utilisées pour la consommation humaine. Depuis plusieurs années, des chercheurs, des universitaires et des organismes publics proposent des produits apicoles pour la biosurveillance de l'état de santé, notamment dans les zones agricoles. Au sein de la colonie, il existe des matrices plus durables comme la cire et la propolis, et d'autres qui se renouvellent rapidement comme le miel et le pollen. La question de savoir si les abeilles constituent un bio-indicateur efficace pour vérifier la présence de polluants dans l'environnement est une question à laquelle il n'est pas possible de donner une réponse univoque car les produits apicoles présentent de nombreux avantages mais aussi plusieurs limites, comme le fait qu'ils ne bioaccumulent pas certains polluants (par exemple les HAP et les métaux dans le miel).⁷¹ La non-bioaccumulation signifie que les concentrations mesurables dans les produits apicoles sont inférieures à celles des matrices environnementales. À titre d'exemple, les métaux sont plus concentrés dans le sol, voire plus de 1.000 fois plus que les concentrations enregistrées dans le miel. Par conséquent, si l'objectif de la surveillance est d'obtenir des informations sur la présence de métaux dans l'environnement, il est conseillé de mesurer les quantités présentes dans le sol (et dans les fleurs qui peuvent les bioconcentrer). Si, en revanche, l'objectif de la surveillance est d'estimer la salubrité du miel, il est nécessaire de mesurer les concentrations de polluants dans cette matrice. Il faut considérer que les abeilles, en échantillonnant un très grand territoire, peuvent encore fournir des informations utiles sur l'état sanitaire de l'environnement, les émissions produites sur un site donné et les causes des effets létaux et sublétaux sur la colonie. Parmi les avantages de l'utilisation des produits apicoles pour surveiller la santé de l'environnement agricole, il est possible de souligner que :⁷¹

- Le comportement, la physiologie, l'écologie et la biologie des abeilles sont bien connus.
- Les apiculteurs sont pratiquement partout dans le monde, il est donc facile de trouver des produits apicoles.
- L'élevage d'abeilles coûte moins cher que d'autres systèmes d'échantillonnage et ne nécessite pas d'équipement sophistiqué.
- Les abeilles échantillonnent une grande surface de terrain (plusieurs kilomètres carrés) et sur une longue période autour de la ruche.
- Les abeilles peuvent fournir des signaux d'alerte rapides en cas d'événements négatifs soudains tels que les traitements phytosanitaires illégaux (par exemple, les insecticides et acaricides distribués pendant la floraison), le rejet de substances toxiques dans l'eau (par exemple, les radionucléides) ou les émissions de substances dangereuses dans l'air (par exemple, les métaux et les HAP provenant des incinérateurs).

Il est important de souligner certaines caractéristiques de la biologie des abeilles pour mieux comprendre les avantages et les limites de l'utilisation des abeilles comme bio-indicateurs. Une ruche d'*Apis mellifera* est composée de 20.000 à 100.000 abeilles, selon la saison et les conditions, réparties en castes : une reine, plusieurs centaines de faux-bourçons (environ 200 à 300 individus présents uniquement au printemps et en été ; globalement, une colonie élève entre 2.000 et 6.000 faux-bourçons par an) et des abeilles ouvrières. Les faux-bourçons et les abeilles ouvrières vivent entre 20 et 50 jours.^{2, 17, 35} Les abeilles ouvrières nées en automne peuvent vivre jusqu'à 180 jours, les faux-bourçons en été jusqu'à 90 jours, et la reine peut vivre entre 2 et 7 ans. Il faut 16 jours pour la reine, 21 jours pour l'abeille ouvrière et 24 jours pour les faux-bourçons pour former un adulte.⁷⁶⁴

Les abeilles sont capables d'échantillonner la zone jusqu'à quelques kilomètres de la ruche ; si la nourriture est disponible, elles ne se déplacent pas au-delà de 1,5 km. Exceptionnellement, elles peuvent se déplacer jusqu'à 10-12 km ; dans le but de réduire la consommation d'énergie,

comme il se doit, elles recherchent de la nourriture et de l'eau aussi près que possible de la ruche.

Les abeilles sont d'excellents échantillonneurs car elles visitent quotidiennement le sol, les fleurs, les arbres (elles recueillent la résine pour produire la propolis), les pousses (elles recueillent le miellat produit par les pucerons), les sources d'eau et recueillent passivement la poussière de l'air (grâce aux poils qui recouvrent une partie de leur corps). Elles effectuent des milliers d'inspections par jour et survolent de très grandes zones autour de la ruche. Au moins un quart des abeilles d'une ruche sont occupées à chercher de la nourriture et de l'eau. Dans de nombreux cas, jusqu'à 50% des abeilles d'une ruche sont des abeilles butineuses, c'est-à-dire des insectes qui partent à la recherche de nourriture ou d'eau (voire plus de 20.000 abeilles, dont au moins 10% s'occupent de la collecte d'eau). Chaque abeille ouvrière, si les conditions environnementales le permettent, effectue au moins 10 voyages par jour, visitant facilement 1.000 fleurs sur lesquelles elle récolte du pollen et du nectar. D'autres caractéristiques intéressantes de la biologie des abeilles qui rendent ces insectes fascinants et en même temps des échantillonneurs efficaces de l'environnement sont les suivantes : ³⁵

- Pour produire un gramme de miel de nectar, des échantillons sont prélevés sur 5.000 à 8.000 fleurs (chaque abeille peut visiter jusqu'à 3.000 fleurs par jour) ; une colonie d'abeilles prélève environ 10 millions de micro-échantillons par jour dans une zone qui peut être comprise entre 5 et 100 kilomètres carrés. À cet égard, il est utile de rappeler que le miel est une substance hydrophile car il contient environ 18% d'eau et, par conséquent, il contiendra plus facilement des substances hydrosolubles.

- Le nectar est aspiré dans la partie de l'intestin qui le transporte, il s'agit d'une dilatation de la première partie du tube digestif ayant une capacité de 50-60 mL (environ 40 mg). Lorsque l'abeille retourne à la ruche, elle régurgite le nectar. Il faut 25.000 voyages pour transporter un litre de nectar.

- Une colonie d'abeilles a également besoin de plus de 40 L/an d'eau ; entre 40 mg d'eau par jour par abeille et jusqu'à environ 300 mg d'eau par jour par abeille en été. Elles peuvent transporter jusqu'à 0,5 L d'eau par jour, mais dans les pays très chauds ou en été, une colonie peut consommer jusqu'à 5 L d'eau par jour. ¹⁷

- Chaque abeille doit visiter entre 80 et 150 fleurs pour remplir ses sacs de pollen. Les sacs à pollen sont situés dans les pattes arrière et peuvent porter chacun un poids de 7,5 mg de pollen ; on peut estimer qu'une abeille peut transporter jusqu'à 200-300 mg de pollen dans la ruche en faisant un maximum de 20 voyages par jour ; cela dépend des fleurs, car certaines produisent beaucoup de pollen et une seule visite suffit pour compléter une charge. Au cours d'une année, une colonie de taille moyenne peut collecter entre 40 et 50 kg de pollen.

La biologie des abeilles leur permet d'être un bio-indicateur qui peut fournir des informations tant sur les polluants omniprésents et constamment présents, comme ceux produits par la combustion du diesel et de l'essence, que sur ceux qui ne peuvent être détectés qu'après certains événements (par exemple, les accidents industriels, les traitements phytosanitaires en agriculture, le déversement de polluants dans l'eau).

Les produits chimiques (xénobiotiques) ¹avec lesquels elles entrent en contact lors de la recherche de pollen, de nectar, de résines (pour produire de la propolis), de miellat (produit par

¹ Le terme xénobiotique est défini comme une substance de toute nature, d'origine naturelle ou synthétique, étrangère à un organisme. Les substances chimiques produites (entre 1 et 100 t/an), commercialisées et enregistrées

les pucerons) et d'eau génèrent des effets sublétaux (par exemple, des changements de comportement, des effets sur le système endocrinien, le métabolisme ou le système nerveux, comme une capacité réduite à s'orienter et à voler) et létaux (par exemple, par des insecticides).^{22, 23}

Entre 9 et 55% des nectars produits par les fleurs contiennent des xénobiotiques, et certains sucres du nectar peuvent être indigestes.¹⁰⁷ Le pollen peut également contenir des xénobiotiques potentiellement toxiques, tels que certains composés phénoliques, des pesticides et des métaux. Les abeilles peuvent également accumuler certaines substances dans leur corps ou dans leurs produits. Le corps des abeilles est couvert de poils qui, en plus de recueillir le pollen, ramassent la poussière et les polluants atmosphériques. Les abeilles peuvent donc fournir des informations sur les contaminants environnementaux par le biais de divers indicateurs :

- Modification du comportement et mesure des effets sublétaux tels que la réduction de la production de miel et l'apparition de maladies. Les indicateurs utilisés pour surveiller la santé des colonies comprennent la viabilité du couvain (mesurée comme le pourcentage de colonies testées qui ont une faible viabilité), le pourcentage d'œufs et de larves perdus.
- La mesure des effets létaux tels que le nombre d'abeilles mortes par jour ou par semaine, la détection de la présence ou de l'absence de la reine des abeilles, la présence et le nombre de larves.
- La mesure de la concentration de polluants dans les différentes matrices : abeilles vivantes, abeilles mortes, miel, pollen, propolis et/ou cire. Les pesticides trouvés dans les abeilles mortes ou vivantes fournissent des informations sur une période de quelques jours, les pesticides trouvés dans le miel fournissent des informations sur une période plus longue et une zone plus large, et les pesticides trouvés dans la cire signalent des événements qui peuvent avoir eu lieu jusqu'à un an auparavant.

Le pollen transporté par les abeilles est une matrice environnementale non transformée, contrairement au miel et à la cire. L'analyse du pollen trouvé sur les abeilles permet de savoir quelles cultures ont été visitées et fournit des informations sur les traitements interdits comme ceux effectués pendant la floraison.

Voici quelques informations importantes à connaître avant d'utiliser des abeilles pour la biosurveillance :

- Les abeilles ne volent pas la nuit.
- Les abeilles ne volent pas à des températures inférieures à +7°C ou +10°C et supérieures à +38°C.⁶⁵
- Pendant l'hiver, les abeilles ne quittent pas la ruche.
- Des règles nationales et régionales spécifiques doivent être respectées lors du déplacement et du positionnement des ruches ; certaines des exigences en Italie sont énumérées ci-dessous. L'enregistrement de la déclaration d'origine et de destination des abeilles en cas de tout type de déplacement des ruches (via internet sur le site vetinfo.it dans la section apiculture).

(par 5.314 entreprises) en Europe (en 2018) sont au moins 10.708 (dont 2.049 sont enregistrées en Italie); la liste des substances enregistrées comprend une liste de substances candidates à l'autorisation très préoccupantes (au moins 200 substances).²³ Le registre CAS est un registre qui a catalogué plus de 148 millions de substances chimiques, organiques et inorganiques avec des séquences de numéros (le numéro CAS ou *Chemical Abstract Service* ou *registre CAS* est une séquence de numéros qui identifie de manière unique une substance chimique, par exemple : eau ou H₂O, CAS :7732-18-5).²²

- Identification des ruchers (un rucher est composé de plusieurs ruches) au moyen d'un numéro de code délivré par l'une des directions régionales de l'agriculture territoriale.
- Lorsque les ruches sont placées dans un nouvel emplacement, le service vétérinaire de l'ASL responsable de la zone doit être informé de l'emplacement des ruches et de la taille du rucher ; le certificat sanitaire de l'ASL d'origine délivré au plus tôt trente jours avant la fixation de la ruche (certifiant la santé des colonies). Le certificat doit faire référence au dernier arrêt extrarégional du rucher.
- Respecter les distances de sécurité par rapport aux habitations, aux routes et aux sites très fréquentés ou particulièrement vulnérables (par exemple, les écoles et les hôpitaux). La législation régionale piémontaise (loi régionale piémontaise n. 20/1998) prévoit que les ruchers doivent être situés à au moins dix mètres des voies publiques et à au moins cinq mètres des limites des propriétés publiques ou privées. L'apiculteur n'est pas tenu de respecter ces distances s'il existe une différence de hauteur d'au moins deux mètres entre le rucher et les endroits indiqués, ou s'il existe entre eux des murs, des haies ou d'autres abris, sans interruption, qui ne permettent pas le passage des abeilles. Ces abris doivent avoir une hauteur d'au moins deux mètres. Ces mesures de précaution ne sont pas suffisantes, surtout dans les zones urbaines. Dans le cas de sites particulièrement attractifs tels que les raffineries de sucre ou les usines de traitement du miel, les ruches doivent être placées à une distance beaucoup plus grande, c'est-à-dire au moins à 1 km.

Plusieurs méthodologies peuvent être utilisées pour mesurer les changements de comportement des abeilles afin d'étudier certains facteurs (par exemple, les insecticides) : ¹⁹⁵

- Mesure de la variation du réflexe d'extension du proboscis à diverses concentrations de différentes substances, et dans différentes conditions. Dans ce test de laboratoire, des stimuli sont envoyés aux antennes des abeilles et l'on vérifie si le réflexe d'extension de la trompe se déclenche et à quelle fréquence. Grâce à ce test simple, il est possible de mesurer l'état physiologique des abeilles, comme le pourcentage de réponses positives à certaines concentrations de sucre, par exemple. Le réflexe d'extension de la trompe peut être associé à des stimuli chimiques mais aussi à des stimuli tactiles (par exemple, du sucre après l'occlusion des yeux des abeilles).
- La mesure de la phototaxie, c'est-à-dire le mouvement des insectes vers la lumière. Dans ce cas, on utilise des environnements artificiels avec différents compartiments, qui peuvent être éclairés ou obscurcis à volonté. Les altérations de la capacité visuelle causées par certaines substances sont mesurées. Ces tests montrent que des abeilles d'âges différents ont le même comportement de phototaxie.
- La mesure de la capacité d'être attiré par différentes odeurs. Ici aussi, on utilise des environnements artificiels dans lesquels l'émission, l'intensité et la direction des émissions d'odeurs peuvent être contrôlées et les mouvements des insectes enregistrés. Grâce à cet équipement de laboratoire, il a été possible de démontrer que les abeilles de différents âges répondent différemment à certaines hormones produites par la reine des abeilles (par exemple : l'hormone mandibulaire de la reine des abeilles attire plus intensément les abeilles âgées de 5 jours).
- Les réactions aux changements de température peuvent être mesurées et les choix préférentiels (thermotaxie) peuvent être vérifiés.
- La capacité de voler peut être évaluée à l'aide d'un équipement spécial.

Grâce à des méthodes simples applicables en laboratoire, il est possible d'évaluer les effets des xénobiotiques, des parasites ou de l'alimentation sur le comportement des abeilles dans différentes conditions.

EXAMEN DE LA COMPOSITION CHIMIQUE DE L'AIR À L'INTÉRIEUR DE LA RUCHE

Les abeilles ont besoin d'oxygène pour vivre, en consommant environ 30 kg par an, et dans le même temps, leur métabolisme produit 52 kg/an de dioxyde de carbone et 34 kg/an d'eau.¹³ Le volume d'air à l'intérieur d'une ruche étant d'environ 0,2 m³, un renouvellement d'air de plus de 150 m³ par an est nécessaire. Pendant le vol, les abeilles consomment environ 5 mL d'oxygène par heure, ce qui correspond à 641 mL d'oxygène par kilogramme de poids corporel par minute. À titre de comparaison, un être humain peut consommer jusqu'à 94 mL d'oxygène par kilogramme de poids corporel par minute lors d'une activité sportive intense. Le métabolisme des abeilles est donc beaucoup plus intense.

L'utilisation de capteurs pour mesurer la composition des gaz et des molécules volatiles dans la ruche peut fournir une grande quantité d'informations. Les produits chimiques volatils présents dans la ruche, tels que les produits de combustion, les solvants industriels, les pesticides et les explosifs, peuvent être contrôlés. Avec une pompe qui aspire l'air et un système de filtration, l'air de la ruche peut être acheminé vers un chromatographe en phase gazeuse avec spectrométrie de masse comme détecteur.^{3, 17} Le système d'admission d'air de la ruche peut être calibré pour aspirer l'air à différentes fréquences et intensités. Cette instrumentation de laboratoire de chimie analytique a le potentiel de détecter des concentrations même très faibles de milliers de molécules différentes et est donc capable de mesurer la présence de substances apportées dans la ruche par les abeilles.⁶² Il a été possible d'associer la présence de molécules dans l'air de la ruche, comme le perchloroéthylène transporté par les abeilles dans la ruche à partir d'une décharge, à un taux de mortalité des reines des colonies de 50%.

Grâce à cette technique, les chercheurs ont mesuré la présence de centaines de molécules d'origine anthropique et potentiellement dangereuses pour les abeilles et les humains. L'instrumentation permet des capacités analytiques très sensibles, mais elle est coûteuse et nécessite un personnel hautement qualifié. Il convient de rappeler que l'air à l'intérieur de la ruche est maintenu à environ 34-35°C, de sorte que de nombreuses substances organiques volatiles sont facilement déterminées par cette méthode.

Les méthodes de chimie analytique permettent de mesurer les différences de concentration de différentes substances dans des ruches situées dans des environnements non contaminés et contaminés, ou de mesurer les changements qualitatifs et quantitatifs dans le temps. Il est également possible de mesurer des substances naturellement présentes dans la ruche, telles que les phéromones (comme celle produite par la reine des abeilles pour gérer et contrôler ses ouvrières ou celles produites en cas d'alarme), les substances contenues dans les produits végétaux comme la propolis, les métabolites de pesticides ou ceux libérés par leurs parasites. Les substances libérées par les matériaux de construction utilisés pour fabriquer la ruche sont également détectées. Le système d'analyse est très sensible, même à de très faibles concentrations. Il faut donc faire attention aux matériaux avec lesquels la ruche est fabriquée, comme les peintures et autres matériaux, par exemple le bois, le polystyrène, le plastique, le polycarbonate, le polyuréthane et les métaux.

Parmi les substances qui peuvent être déterminées à l'aide de ces techniques, on peut citer : les alcanes, les alcènes, les alcynes, les cycloalcanes, les hydrocarbures aromatiques, les terpènes, les diphényles, les alcools, les éthers, les cétones, les aldéhydes, les acides, les esters, les amines et autres composés organiques azotés et soufrés, les composés organochlorés tels que les insecticides et les solvants. Pour avoir une idée de la puissance de cette technique, nous rapportons les résultats d'un travail scientifique très intéressant dans lequel les substances

suivantes ont été détectées dans l'air de ruches situées dans une zone urbaine à l'Université du Montana aux Etats-Unis : ¹⁷

- plus de 85 phéromones différentes produites par les abeilles telles que l'histamine (défense des abeilles ouvrières), le géraniol (guidage des abeilles ouvrières), les diesters (construction des cellules par les abeilles ouvrières), l'acide hexanoïque (reconnaissance de la reine) ;
- plus de 45 substances généralement libérées par le nectar, le miel, la cire, le pollen ou la propolis, telles que l'acide palmitique, la vanilline, l'eucalyptol et le propylène glycol de la propolis, les stérols du pollen, les alcanes des cires et les acides organiques, les alcools et les alcaloïdes du miel ;
- plus de 10 substances dérivées du bois utilisé pour construire la ruche (par exemple, le limonène) ; le bois peut être traité avec des substances (comme le naphthénate de cuivre) qui se retrouvent dans les abeilles à des concentrations élevées (21 ppm) ; ¹⁰⁷
- plus de 15 substances dérivées du vernis utilisé sur le bois de la ruche, comme les phénols et le méthylnaphtalène ;
- plus de 10 substances dérivées des parties en plastique de la ruche (polyéthylène et vinyle) telles que le xylène et le propylbenzène ;
- plus de 10 substances dérivées de la combustion de parties de plantes utilisées pour la fumigation des ruches ;
- plus de 100 substances dérivées de la combustion (véhicules diesel, essence et méthane) telles que le benzène, l'éthylbenzène, le toluène, les xylènes, le naphtalène ;
- plus de 45 substances dérivées d'activités industrielles telles que les solvants, le trichloroéthène, le dibromo-méthane-trichlorométhane, le chlorotoluène, le tétrachloroéthène, le tétrachlorométhane ;
- plus de 10 pesticides tels que l'endosulfan, l'aldrine, la dieldrine, le carbaryl et le DDT.

Beaucoup de ces substances auraient probablement été trouvées en échantillonnant l'air à l'extérieur de la ruche. A titre d'exemple, les concentrations maximales de certaines substances très dangereuses mesurées dans l'air de la ruche sont indiquées ci-dessous :

- naphtalène (également connu dans le commerce sous le nom de naphtalène) 16 ppt ou parties par billion : préfixe du système international équivalent à 10^{18} ;
- benzène 170 ppt (cancérogène) ; ¹⁰⁰
- 1,1,1-Trichloroéthane 826 ppt : il s'agit d'un solvant chloré et d'un propulseur d'aérosol interdit par le protocole de Montréal parce qu'il est considéré comme responsable de l'élargissement du trou d'ozone et qu'il est mortel pour les insectes et les espèces du milieu aquatique) ; ⁵⁹
- cis 1,2-Dichloroéthène 839 ppt ;
- toluène 1,643 ppt (substance nocive) ; ¹⁰¹
- styrène 9,239 ppt (cancérogène).

Il est facile de voir qu'avec cette capacité d'analyse, il est possible de connaître et de prévoir la santé des abeilles, mais aussi de disposer d'informations détaillées sur les activités industrielles, agricoles et urbaines de la région. Il est possible de surveiller les substances libérées par les abeilles, le miel, la cire et la propolis, ainsi que celles présentes dans l'air en raison des activités humaines. Les limites de cette méthode sont le coût, la nécessité d'un personnel qualifié et le fait que certains polluants dangereux peuvent n'être détectables dans l'air de la ruche que pendant quelques heures ou quelques jours.

HYPOTHÈSE DE BIOSURVEILLANCE AVEC LES ABEILLES

CARACTÉRISATION DU SITE OÙ LA BIOSURVEILLANCE DOIT ÊTRE EFFECTUÉE

La mise en œuvre de la biosurveillance nécessite la planification de différentes activités et, afin d'économiser des ressources, il est important de tenir compte des résultats consolidés des enquêtes précédentes. Une étape préliminaire consiste à caractériser le site, par exemple en le classant comme étant de faible ou de forte intensité agricole. La classification doit tenir compte des activités anthropiques présentes à proximité des ruches, dans un rayon de quelques kilomètres. La caractérisation du site et sa classification comme urbain, agricole ou industriel doit être effectuée dans un rayon minimum de 1,5 km et si nécessaire jusqu'à 12 km de la ruche. La classification d'une zone est importante car, par exemple, on trouve des pesticides plus fréquemment et en plus grande quantité dans les zones agricoles que dans les zones urbaines. La zone peut être classée comme agricole (avec exploitation intensive) si plus de 50% de la surface est utilisée pour la culture.⁵⁴ L'objectif de cette classification est de mettre en évidence les sources d'émissions possibles (par exemple, les incinérateurs, les cultures, les autoroutes, etc.) Les subdivisions qui ont déjà été mises en œuvre peuvent être utilisées pour cette activité. Les activités de biosurveillance peuvent donc être accompagnées d'opérations de soutien complémentaires très utiles et souvent nécessaires. Plusieurs catégories d'informations peuvent être utilisées pour effectuer la classification des zones.

- Le recensement des activités sur le territoire telles que les sites industriels, les dépôts et centres de traitement des déchets, les sites à remettre en état, les autoroutes ou autres routes.
- Dans certains territoires, des inventaires des émissions et des rejets civils et industriels sont disponibles.
- Le recensement des cultures présentes et l'élaboration de cartes culturelles mettant en évidence les plantes prédominantes ou les plus importantes présentes sur le site (par exemple, celles en fleurs).
- La collecte d'informations sur d'autres contrôles chimiques tels que le sol, l'eau et l'air dans les mêmes zones. En Italie, l'état de l'eau et les polluants atmosphériques sont surveillés par les instituts de recherche et les autorités sanitaires, et de nombreux résultats sont publics.
- Surveillance de la fertilité et de la santé des sols. Les sols sont classés par les régions en différentes catégories en fonction de leur niveau de fertilité.
- Examen des résultats d'autres biosurveillances telles que celles réalisées avec des lichens pour évaluer la pollution atmosphérique. L'indice de biodiversité des lichens est utilisé pour obtenir des informations sur le niveau de pollution atmosphérique et est calculé en mesurant le nombre d'espèces de lichens présentes par unité de surface. La biodiversité des lichens diminue rapidement en présence de substances gazeuses toxiques et, si les conditions s'améliorent, elle se rétablit en quelques années. En général, les lichens pris en considération sont des lichens épiphytes, c'est-à-dire ceux qui poussent sur le tronc des arbres. L'indice de biodiversité des lichens est utilisé pour évaluer la pollution par des métaux tels que le mercure ou le cadmium.⁵¹

- Classification de l'état sanitaire des cours d'eau à proximité de la station de biosurveillance. En Italie et dans la plupart des pays européens, les cours d'eau de surface et les lacs ont été classés en fonction de leur qualité chimique, physique et biologique. La biosurveillance dans les cours d'eau et les lacs avec des poissons et d'autres organismes peut également fournir des informations utiles.
- Collecter des informations sur les pesticides utilisés, par exemple en consultant les carnets de terrain, les données sur les ventes de pesticides et les spécifications de production adoptées (traditionnelle, intégrée ou biologique). Les ingrédients actifs les plus utilisés sont aussi ceux que l'on trouve le plus facilement. Il peut être utile de savoir que la biosurveillance officielle des pesticides trouvés dans les aliments d'origine végétale est publiée chaque année par le service de santé et le ministère de l'agriculture.

L'élaboration finale des résultats, outre la prise en compte des informations qui viennent d'être soulignées, peut faire appel à tous les résultats publiés dans la littérature technique et scientifique.

COMBIEN DE RUCHES UTILISER ET OÙ LES PLACER

Les ruches peuvent être placées à proximité de la culture lorsque 20-25% des fleurs sont déjà ouvertes, de sorte qu'elles commencent à assister à la floraison souhaitée à temps pour assurer les services de pollinisation et de production de miel.

Pour réaliser une biosurveillance avec des abeilles, on place souvent au moins deux ruches à quelques dizaines ou au maximum quelques centaines de mètres du site à surveiller. Dans certains travaux de biosurveillance, on choisit 2 à 8 ruches par rucher sur lesquelles on prélève des échantillons : elles constitueront une station d'échantillonnage biologique. Les colonies ne doivent pas être déplacées pendant au moins trois mois car il faut éviter le nomadisme.⁷¹ Le déplacement des ruches par les apiculteurs peut constituer un obstacle à l'interprétation des données, par exemple en ce qui concerne les sources de polluants tels que les pesticides, les métaux ou les hydrocarbures aromatiques polycycliques. Si l'on souhaite obtenir des informations sur de plus longues périodes, il est utile de ne pas déplacer les colonies d'un site, même pour quelques années. Ainsi, par exemple, les concentrations de radionucléides dans la cire peuvent être comparées dans le temps.

Dans le but de mesurer des différences et des variations significatives des concentrations de polluants dans l'espace et dans le temps, il est avantageux d'utiliser plusieurs ruches placées dans des zones présentant un niveau de contamination prévisible différent. Il pourrait être prévu de placer les ruches dans des zones contaminées et non contaminées afin de mesurer les différences. En outre, en disposant les colonies de manière appropriée dans la zone et en étudiant les gradients de concentration de polluants dans les différentes ruches, il est possible d'identifier les sources ponctuelles d'émissions.

La biosurveillance pourrait impliquer l'utilisation de 12 colonies permanentes : trois dans une zone industrielle, trois dans une zone agricole, trois dans une zone urbaine et trois dans une zone telle qu'une réserve naturelle ou un parc.⁷¹ Des ruches dédiées peuvent être utilisées ou des accords peuvent être établis avec des apiculteurs locaux. Il est réaffirmé que tous les ruchers ne doivent pas être nomades. Il est préférable d'utiliser des nouvelles colonies (sur une base annuelle) et du même âge afin de réduire les effets qui pourraient altérer les résultats.

RUCHE ÉQUIPÉE DE CAPTEURS PERMETTANT D'OBTENIR DES INFORMATIONS SUR LA SANTÉ ET LE COMPORTEMENT DES ABEILLES

Il est possible de contrôler la santé de chaque colonie en équipant la ruche d'une série de capteurs capables de mesurer en permanence le poids, l'humidité, la température, les sons, les vibrations, les gaz respiratoires et le nombre d'abeilles qui entrent et sortent.^{11, 15, 82, 85} La combinaison de ces paramètres permet d'évaluer l'état de santé de la colonie et la présence de facteurs qui, d'une manière ou d'une autre, nuisent aux insectes et modifient leur comportement.^{15, 20, 87} L'objectif est d'insérer dans la ruche une série de capteurs qui peuvent être contrôlés à distance et qui ne perturbent pas la colonie.²⁰

Il est possible de surveiller l'entrée et la sortie des abeilles de la ruche ou la variation du poids de la ruche à l'aide de capteurs spéciaux.^{15,216} Les capteurs doivent être contrôlés périodiquement pour s'assurer qu'ils ne sont pas altérés par les abeilles, par exemple en les recouvrant de leurs propres produits tels que la cire ou la propolis. Grâce à des systèmes photo-électriques, qui doivent nécessairement être traversés par les abeilles entrant ou sortant de la ruche, il est possible de compter les insectes sortis ou non.¹⁹⁵

La distribution d'insecticides peut rapidement réduire le nombre d'abeilles qui reviennent, tandis que le froid soudain réduit le nombre d'abeilles qui volent à la recherche de nourriture, jusqu'à les arrêter complètement. La température, l'humidité et la concentration des gaz respiratoires sont étroitement liées au métabolisme des abeilles. Tous ces paramètres peuvent être utilisés comme indicateurs de la santé de la colonie.

Une augmentation de l'intensité des sons et une diminution de l'humidité et de la température sont considérées comme des signes précurseurs de l'essaimage (à une humidité inférieure à 50%, les œufs n'éclosent pas).^{20, 972} Des instruments capables de détecter les sons produits par les abeilles étaient déjà vendus au Royaume-Uni dans les années 1960.^{31, 92} En examinant les sons, il est possible de prédire, par exemple, quand les abeilles sont sur le point d'essaimer, c'est-à-dire quand la vieille reine et une partie des ouvrières (environ 10.000) partiront à la recherche d'une nouvelle maison, laissant la ruche à une nouvelle génération. Il existe plusieurs modèles.^{3, 89, 90}

Les sons émis par la colonie sont influencés par l'exposition aux pesticides. L'exposition aux insecticides néonicotinoïdes rend la colonie moins bruyante.³ En mesurant la variation des sons, on peut espérer détecter la perte de la reine des abeilles ou la présence de parasites tels que les acariens (*Varroa*).

Un autre outil permet de compter le nombre d'abeilles qui entrent et sortent de la ruche. Grâce à des programmes informatiques et téléphoniques, il est possible de savoir à distance combien d'abeilles sont à l'intérieur de la ruche et combien sont en vol.⁹³ Le nombre d'abeilles non retournées dépassant certains seuils est un signe inquiétant de mortalité accrue. Environ 90% des abeilles qui ont volé vers la ruche chaque jour reviennent, et si le taux de retour quotidien tombe en dessous de 80%, il se peut qu'il y ait eu un épisode de toxicité aiguë (par exemple, distribution d'insecticides).

Au fil du temps, la variation du poids de la ruche fournit des informations importantes sur l'état de santé et la disponibilité du miel. Une variation rapide du poids a également été associée à la présence de l'acarien parasite de la trachée (*Acarapis woodi*)^{1, 20} La détection de la variation du

¹ L'acarien trachéen *Acarapis woodi* vit et se reproduit à l'intérieur des voies respiratoires de l'abeille, qu'il ne quitte que pour infester d'autres abeilles. L'acarien perce les tubes trachéaux de l'abeille avec ses pièces buccales et aspire l'hémolymphe de l'hôte. Le parasite ne peut être identifié qu'au microscope en raison de sa petite taille. Les symptômes des acariens sont difficiles à identifier et se superposent à ceux d'autres maladies typiques des ruches. Le diagnostic et donc le degré d'infestation étant difficiles à identifier, le traitement le plus efficace est la destruction des familles infectées.²¹

poids peut fournir des informations sur la disponibilité du nectar et du pollen et sur l'abandon de la ruche. L'absence de prise de poids, due à un manque de production de miel ou à des changements de la température interne, est une autre sonnette d'alarme (les abeilles se maintiennent constamment entre 34°C et 35,5°C même en hiver).⁹⁵ Le poids et la température sont donc deux indicateurs importants.

Il est possible de construire des ruches technologiques capables de communiquer à distance toute une série d'informations sur la santé des insectes.⁸³ Les systèmes de surveillance automatique permettent d'économiser des déplacements et des contrôles, de fournir des informations continues à distance et sans déranger la colonie avec des inspections, qui nécessitent entre autres d'enfumer ; ils signalent également tout acte de vandalisme.¹³ Grâce à ces capteurs, il est possible de mesurer les effets létaux et sublétaux (modification du comportement, par exemple) des polluants sur la colonie d'abeilles.

Des capteurs pourraient être utilisés pour surveiller les sites sensibles. En Allemagne, certains aéroports mettent en œuvre la biosurveillance en utilisant des abeilles pour obtenir des informations sur la présence éventuelle de substances dangereuses.³ Lorsque certains seuils sont dépassés (par exemple, mortalité, changements de température et de poids), une inspection approfondie peut être envisagée pour évaluer la présence de parasites et l'échantillonnage des abeilles mortes, du miel, du pollen et de la cire.

Les limites à l'utilisation de capteurs et de systèmes de communication sans fil sont le coût, la nécessité d'une alimentation électrique sur le site des ruches, le recours à des personnes qualifiées pour interpréter les données et l'utilisation de programmes informatiques (certains capteurs sont vendus avec des panneaux solaires et des batteries).

INDICATEURS POUR L'ÉCHANTILLONNAGE DANS LES RUCHES

La biosurveillance doit être effectuée à la période de l'année où les abeilles sont les plus actives, c'est-à-dire entre avril et juillet, mais peut être prolongée en automne (octobre en Italie). Il est utile de rappeler que les abeilles ne volent pas la nuit, s'il pleut et en hiver (elles ne volent pas à des températures inférieures à 10°C), et que les fleurs sont nécessaires à la production de miel. Il faut également tenir compte du fait que les précipitations réduisent la quantité de polluants dans l'air, les conditions météorologiques seront donc une variable à prendre en considération. Afin d'obtenir de meilleures informations sur les hydrocarbures aromatiques polycycliques, les métaux et les polluants présents dans l'air et le sol, il convient d'éviter de prélever des échantillons lorsqu'il pleut.⁶⁶

Un certain nombre d'indicateurs peuvent être utilisés pour évaluer l'état de santé de la colonie. Ils peuvent fournir des informations utiles pour établir des seuils, au-delà desquels l'échantillonnage devient plus utile. Des exemples de signaux à examiner pour décider du moment de l'échantillonnage sont donnés ci-dessous.

Le changement soudain du nombre d'abeilles mortes dans la colonie est un indicateur utile. Dans certaines études scientifiques, des valeurs seuils de 250 ou 350 abeilles mortes par semaine ont été adoptées. Les abeilles mortes sont collectées dans deux ruches qui forment une station de contrôle. Grâce à des pièges spéciaux, les abeilles mortes peuvent être collectées à proximité et à l'intérieur de la ruche et retirées de la colonie.^{17, 33} Au moins un millier d'abeilles meurent chaque jour dans une ruche, mais elles ne représentent qu'une fraction des butineuses qui ne reviennent pas à la ruche (surtout pendant les mois entre mai et juillet). On peut estimer qu'un taux de mortalité d'environ 2,5% des individus de la colonie, soit environ 175-250 abeilles pour 10.000 abeilles par ruche et par semaine, est normal. Cependant, il sera utile d'effectuer un suivi quotidien ou hebdomadaire et d'enregistrer les variations anormales. Les indices

permettant d'évaluer la gravité croissante peuvent être considérés comme suit : jusqu'à 200 abeilles mortes par semaine, entre 201 et 400, entre 401 et 800 ou plus de 800 abeilles mortes par semaine.

Le pourcentage quotidien d'abeilles ne revenant pas à la ruche peut être déterminé à l'aide de détecteurs d'abeilles électroniques qui enregistrent automatiquement les insectes entrant et sortant de la ruche. Dans ce cas, un seuil de 20% d'abeilles non retournées parmi les abeilles qui se sont envolées peut être considéré comme un seuil d'alarme. Des évaluations spécifiques doivent être faites pour chaque contexte et les changements soudains tels que l'absence de reine, le manque de larves et/ou un excès de faux-bourçons (plus de 300 par colonie) doivent être enregistrés. L'altération de la composition des colonies peut également être évaluée en examinant l'évolution du contenu cellulaire des rayons au fil du temps. La mesure des cellules vides et occupées et la distinction entre les différents contenus cellulaires peuvent fournir des informations utiles. Certaines études scientifiques photographient les nids d'abeilles sur une base hebdomadaire et utilisent des programmes de traitement d'images pour mesurer en détail le nombre de cellules, leur contenu et les changements de surface. De cette façon, il est possible d'obtenir des informations sur l'état de santé de la colonie mais on crée une perturbation qui peut être importante.

Les changements de poids de la ruche dus à la mort des abeilles ou à la consommation de miel peuvent être mesurés par des systèmes automatiques et fournir des indications à distance sur l'état de santé.

La présence de parasites tels que des acariens, des bactéries ou des virus peut signaler un affaiblissement de la capacité de la colonie à se défendre, qui peut être renforcée par la présence de contaminants chimiques.

La variation de température au sein de la colonie peut être mesurée à l'aide de capteurs spéciaux qui l'enregistrent automatiquement. Les abeilles maintiennent une température constante dans la ruche, autour de 34-35°C, même en hiver, de sorte que des variations peuvent indiquer la présence de facteurs négatifs.

La surveillance des paramètres ci-dessus peut fournir des indications utiles sur le moment où il faut échantillonner les abeilles (mortes ou vivantes), le miel ou la cire. Si la ruche est équipée de dispositifs permettant de surveiller le poids, les abeilles qui entrent et sortent de la ruche et la température interne de la colonie, l'échantillonnage peut être programmé dès les premiers signes de détresse de la colonie. Les changements dans ces indicateurs peuvent être corrélés avec les concentrations de substances toxiques. De nombreuses études scientifiques confirment ce à quoi on peut s'attendre : la mortalité et l'incapacité à revenir à la ruche augmentent avec la concentration de certains pesticides dans les produits apicoles, les larves et les abeilles adultes.

QUELLE MATRICE DE RUCHE ÉCHANTILLONNER POUR LA SURVEILLANCE DES MÉTAUX

Il n'y a probablement pas de réponse concluante quant à la matrice de la ruche (abeilles vivantes ou mortes, larves, miel, cire, propolis) qui convient le mieux à la biosurveillance. Dans chaque contexte, il faudra examiner plusieurs variables qui influenceront le choix de la méthodologie.

Le pollen et la propolis sont les matrices les moins transformées de la ruche et représentent donc le mieux la pollution de l'environnement (par exemple par des pesticides ou des isotopes radioactifs), tandis que la cire est produite par des glandes situées sur l'abdomen des abeilles et que le miel provient du nectar des fleurs qui a été transformé dans le tube digestif et échangé entre abeilles (trophallaxie ou partage social du nectar).

Les abeilles vivantes sont un meilleur indicateur que le miel pour mesurer la pollution atmosphérique par les métaux.⁷¹ Les métaux suivants peuvent être trouvés dans le miel à de très faibles concentrations : argent (Ag), aluminium (Al), chrome (Cr), nickel (Ni), cuivre (Cu), plomb (Pb), zinc (Zn) et soufre (S). Les abeilles en contiennent des concentrations plus élevées que le miel, bien que les informations fournies par les analyses du miel soient plus reproductibles. La concentration dans la propolis est similaire à celle enregistrée dans le corps des abeilles et est environ 10 fois plus élevée que celle trouvée dans le miel.³⁴ Les concentrations de cadmium, de chrome et de plomb sont plus élevées dans les abeilles vivantes que dans les abeilles mortes et le miel.³³ Les abeilles vivantes sont un bio-indicateur possible de la pollution atmosphérique par les métaux. Il est possible d'échantillonner 100 insectes et une station de surveillance peut être constituée de 2 ruches, de sorte que 50 abeilles par ruche peuvent être échantillonnées chaque semaine ou chaque mois. La mesure des concentrations bihebdomadaires dans les abeilles vivantes ou des concentrations mensuelles dans le miel frais permet de détecter les pics pendant les mois associés aux activités anthropiques, comme celles des industries qui rejettent des émissions dangereuses à certaines périodes de l'année (par exemple le chrome).^{17, 33, 34} Certains travaux montrent que les abeilles fortement contaminées par des métaux produisent un miel faiblement contaminé.⁷¹ Les abeilles sont donc capables de détecter une augmentation des concentrations de métaux dans l'environnement plus efficacement que le miel.

Le miel ne bioaccumule pas les métaux et il existe une variabilité considérable entre les différents échantillons, influencée par l'origine florale, la saison, etc. Certains chercheurs pensent qu'il n'est pas possible de corrélérer les concentrations de métaux dans le sol avec celles du miel. Selon certains chercheurs, il n'est pas possible d'établir une corrélation entre la concentration de métaux dans le sol et celle dans le miel. En conclusion, il est préférable d'utiliser des abeilles vivantes pour la surveillance des métaux plutôt que des abeilles mortes (l'inverse est vrai pour les pesticides). En outre, les abeilles vivantes constituent une meilleure matrice pour la surveillance des métaux que le miel.⁷¹

En prélevant des abeilles vivantes, il est possible de décider de l'âge, de la taille de l'échantillon, du moment où il faut le prélever, d'analyser l'origine florale du pollen transporté et de surveiller où les abeilles ont volé. La détermination des métaux dans le pollen peut fournir des informations sur la contamination des plantes. Les différents types de plantes visitées par les abeilles ont une influence significative sur la contamination par les métaux : par exemple, les plantes à feuilles persistantes génèrent du nectar et donc du miel contenant des quantités plus élevées de métaux que les plantes à feuilles caduques ; les plantes aromatiques concentrent plus facilement certains polluants que les plantes herbacées.⁷¹ Certaines plantes sont tolérantes à de fortes concentrations de métaux et peuvent les bio-concentrer en grande quantité. Le pollen et la propolis peuvent être utilisés comme indicateurs de la contamination atmosphérique par des métaux tels que le cadmium (Cd) et le plomb (Pb).⁷¹

La cire est probablement la meilleure matrice dans laquelle chercher les métaux. Une biosurveillance qui a recherché le cadmium, le nickel, le plomb, le fer, le zinc et le magnésium dans des échantillons de miel (multifloral), de propolis, de pollen d'abeilles retournant à la colonie et de cire a confirmé que ce dernier contenait la plus grande quantité et le miel la plus faible.⁴⁰ En conclusion, la cire est la meilleure matrice pour ce type d'analyse (par exemple le plomb et le cadmium), suivie du pollen et de la propolis, et enfin des abeilles. La mesure des métaux dans le miel, qui est un aliment, peut avoir d'autres objectifs tels que l'évaluation de la sécurité alimentaire.

BIOSURVEILLANCE DES RADIONUCLÉIDES DANS LES RUCHES D'ABEILLES

Pour les radionucléides, certains auteurs s'accordent à dire que les abeilles vivantes et le miel sont de bonnes matrices, mais le pollen est probablement la meilleure, bien que de nombreuses études ne l'utilisent pas.⁷¹ Les isotopes radioactifs (ou radionucléides) du césium et du strontium (^{137}Cs et ^{90}Sr) ont été recherchés dans les abeilles mortes et le pollen, et ce dernier s'est révélé être un meilleur indicateur environnemental de la radioactivité que les abeilles (l'échantillonnage des abeilles mortes peut être hebdomadaire ou mensuel).^{17, 34, 38}

La concentration de certains radionucléides (^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{137}Cs , ^{90}Sr et ^{40}K) dans le miel est fortement influencée par les plantes visitées. Le miel de miellat (de sapins et de conifères) et le miel de bruyère (*Calluna vulgaris*) sont de bons indicateurs de la présence d'isotopes de césium dans l'environnement.¹⁷ Il s'agit d'isotopes qui n'existent pas dans la nature et qui sont donc produits par des accidents et des explosions nucléaires ; ils sont également utilisés à des fins de recherche, dans les cliniques et dans les secteurs industriels où ils pourraient être libérés illégalement en tant que déchets ou à la suite d'accidents industriels.

La mesure de la présence de radionucléides étant très sensible, elle fonctionne probablement bien dans les matrices moins contaminées comme le miel.³⁴

La bioaccumulation de polluants dans la chaîne alimentaire est un phénomène dangereux qui peut également être enregistré dans les produits de la ruche. Il est utile à ce stade d'introduire un aspect qui sera abordé plus en détail par la suite. Le miel de miellat est un bio-indicateur très intéressant car il a la capacité d'accumuler plus facilement certaines substances (par exemple les pesticides, les hydrocarbures aromatiques polycycliques, les isotopes radioactifs et les métaux). Dans ce cas, la chaîne alimentaire implique un passage d'abord entre la plante et les pucerons, puis entre les pucerons et les abeilles. Par conséquent, les facteurs de bioconcentration peuvent être 10 ou 100 fois plus élevés en raison du passage par un niveau trophique supplémentaire. Le miel de miellat a montré, parmi les produits apicoles, les niveaux les plus élevés de radioactivité, ce qui est prévisible puisque les isotopes sont bioaccumulés d'abord dans les plantes, puis dans les pucerons et ensuite dans les abeilles, augmentant ainsi la concentration dans la chaîne alimentaire. Le miel de miellat est un meilleur indicateur de la contamination de l'environnement par les radionucléides (isotopes métalliques radioactifs) car la radioactivité est 10 à 100 fois plus élevée que dans les miels de nectar (par exemple dans le cas de l'isotope du césium : ^{137}Cs).¹⁷ Le miel de miellat provenant de ruches situées près de sapins et de conifères peut être utilisé pour surveiller de nombreux métaux (césium, chrome, rubidium, cuivre, plomb et nickel). Par conséquent, le miel de miellat est un meilleur bioindicateur que le miel de nectar et peut être utilisé pour surveiller la variation des niveaux de contamination radioactive sur de vastes zones.

Pour mesurer la radioactivité, le pollen est un meilleur bio-indicateur que les abeilles et les abeilles sont meilleures que le miel.⁷¹ La cire et la propolis sont de meilleures matrices que le miel et les abeilles pour la mesure des radionucléides.⁶¹ En conclusion, si l'on veut mesurer la présence de métaux radioactifs à travers les produits de l'apiculture, il est préférable d'étudier le pollen, la cire, la propolis ou le miel de miellat (le pollen fournit des informations sur la bioaccumulation dans les plantes). La cire est la matrice la plus facile à trouver pour rechercher des radionucléides dans la ruche et le pollen est utile pour obtenir des informations sur la contamination radioactive des plantes visitées par les abeilles. L'analyse palynologique peut être combinée avec la mesure des métaux stables et instables afin d'obtenir des informations sur les plantes visitées et la zone géographique.

Les différents objectifs de surveillance doivent tenir compte de cette variabilité. La mesure des contaminants dans les produits apicoles doit être réalisée dans des sites potentiellement non contaminés (comme témoin) et dans des matrices environnementales de référence (par exemple

le sol et les plantes) avec un choix approprié des molécules à surveiller. Pour donner deux exemples, le césium est un bon marqueur des accidents et explosions nucléaires qui se sont produits jusqu'à 30 ans plus tôt et à des centaines de kilomètres de distance. Le potassium (isotope 40) est un bon indicateur de la radioactivité naturelle.

Dans le but de suivre la variation de la présence de radionucléides dans le temps, 2 à 4 échantillons par an pourraient être prélevés en fonction de la demi-vie des isotopes recherchés. Pour la surveillance des isotopes ayant une demi-vie de plusieurs années, un échantillon par an peut être suffisant.

Si des événements indésirables tels qu'une contamination accidentelle de l'eau ou des rejets soudains de substances toxiques dans l'air sont prévus, un échantillonnage hebdomadaire peut être planifié. L'exemple d'un accident industriel libérant l'isotope 137 du césium est donné ici : il s'est produit en 1998 dans une fonderie en Espagne.^{17, 34}

DÉTECTION DES HYDROCARBURES AROMATIQUES POLYCYCLIQUES

Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) peuvent être surveillés en examinant les concentrations dans les abeilles vivantes et le miel. Cependant, la cire est probablement la meilleure matrice pour détecter ces molécules hydrophobes, car avec la propolis, elles enregistrent la plus grande quantité. Si des informations sur la présence de HAP et de métaux rejetés dans l'atmosphère sont nécessaires, un échantillonnage peut être effectué tous les 15 ou 30 jours, et des informations peuvent également être obtenues auprès des stations de surveillance de l'air (par exemple, celles de l'ARPA ou de l'Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente, en Italie). Il pourrait être utile de placer un rucher près des stations qui mesurent les polluants atmosphériques.

SURVEILLANCE DES PESTICIDES DANS LES DIFFÉRENTS PRODUITS APICOLES

La surveillance des pesticides peut être déclenchée lorsque les seuils de mortalité sont dépassés chez les abeilles adultes, qui sont de meilleurs bio-indicateurs que les abeilles vivantes pour déterminer la molécule qui a probablement contribué à leur mort.⁷¹ Les analyses de pesticides peuvent être effectuées sur des abeilles vivantes et sur les abeilles mortes de la colonie ; ces dernières sont collectées à l'aide de pièges spéciaux lorsque le nombre seuil d'abeilles mortes est dépassé. Entre 5 et 50 abeilles mortes sont échantillonnées par ruche ; plus l'échantillon est grand, plus l'information est fiable. Les abeilles peuvent être lavées avec des solvants (comme l'acétone) pour extraire et mesurer les pesticides à la surface du corps, puis homogénéisées pour extraire les pesticides accumulés à l'intérieur.

Les pesticides peuvent également être recherchés dans le miel et le pollen, car le miel est une denrée alimentaire et le pollen fournit des informations sur la contamination des plantes. La recherche de pesticides dans le pollen permet d'enquêter sur d'éventuelles utilisations illégales de pesticides et d'exclure leur utilisation par les apiculteurs : des échantillons de pollen peuvent être prélevés directement sur les abeilles dès leur retour à la ruche à l'aide de pièges spéciaux, qui seront placés 2 à 7 jours avant le prélèvement.³² Le pollen présent dans les cellules de la ruche peut être utilisé, car il peut aussi être contaminé par les produits utilisés par les apiculteurs et peut avoir échangé certaines substances avec la cire. Le pollen est la matrice la plus appropriée pour le suivi des traitements phytosanitaires sur le terrain et le miel peut être utilisé pour étudier les produits utilisés par les apiculteurs.³⁹ La cire est la matrice où l'on peut mesurer

les plus fortes concentrations de pesticides, comme les acaricides utilisés par les apiculteurs pour lutter contre le *Varroa*. La cire enregistre les traitements effectués sur le terrain et par les apiculteurs sur une longue période, et le miel contient plus facilement les molécules hydrophiles. Les concentrations de pesticides diminuent de la cire au pollen et enfin au miel.⁴¹

Une étude montre que 161 pesticides ont été trouvés dans des ruches du monde entier, dont 124 dans le pollen, 95 dans la cire et 77 dans le miel ou le nectar.⁴⁵ Les concentrations les plus élevées de pesticides ont été trouvées dans la cire (concentration moyenne de 126 µg/kg), suivie du pollen (concentration moyenne de 66 µg/kg). Sur les 124 pesticides présents dans le pollen, 70 ne se retrouvent que dans cette matrice et pas dans le miel. Sur les 77 ingrédients actifs présents dans le miel, 23 n'ont été trouvés que dans cette matrice et les insecticides néonicotinoïdes sont les plus faciles à trouver. Il n'est donc pas facile de généraliser et de nombreux facteurs doivent être pris en compte, tels que les caractéristiques chimiques et physiques des molécules à rechercher et les matrices disponibles.

Certaines études remarquent que les matrices les plus contaminées par les pesticides sont, par ordre décroissant, le miel, le pollen et les abeilles : le miel, dans ces cas, est fortement contaminé par les produits utilisés par les apiculteurs et les résidus dans la cire n'ont pas été étudiés ; tandis que d'autres études enregistrent un ordre différent, le pollen étant plus contaminé (par ordre décroissant : pollen, miel et abeilles). Là encore, les résidus dans la cire n'ont pas été étudiés.³⁹ La cire est une excellente matrice de détection des contaminants utilisée par les agriculteurs et les apiculteurs.

Si on décide d'étudier la cire et le miel, il sera possible de prélever des échantillons à la fin du printemps, pendant l'été et éventuellement aussi au début de l'automne.

Pour obtenir des informations sur les traitements phytosanitaires, l'échantillonnage peut être programmé tous les 5 à 15 jours, en fonction de la durée de la période de floraison fréquentée par les abeilles. En Italie, la majorité des traitements phytosanitaires sont effectués au printemps, c'est donc à cette période qu'il sera possible d'enregistrer les pics de concentration environnementale de pesticides et le plus grand nombre d'événements de mortalité ou de souffrance des abeilles. Le pollen est la matrice la plus adaptée au suivi des traitements phytosanitaires sur le terrain, s'il est prélevé avant d'être stocké dans la ruche ; le miel et la cire sont adaptés pour obtenir des informations sur les produits utilisés par les apiculteurs. La cire est ici la meilleure matrice, car de nombreux polluants sont lipophiles et s'accumulent pendant des mois ou des années (la cire est recyclée par les apiculteurs, ce qui augmente sa contamination et donc le risque pour les abeilles). Les substances apolaires telles que les acaricides utilisés par les apiculteurs contre *Varroa* (coumaphos et tau-fluvalinate) peuvent se retrouver dans cette matrice longtemps après le traitement.⁶⁷ L'un des premiers enregistrements de colonies de *varroas* résistantes au fluvalinate remonte à 1998.⁹⁷⁴ Le miel est plus susceptible de contenir des substances hydrophiles telles que certains insecticides (néonicotinoïdes et lindane¹) tandis que la cire contient des substances hydrophobes.^{45, 182}

Pour connaître les espèces visitées par les abeilles, on peut procéder à une analyse palynologique, c'est-à-dire à la détermination des espèces de pollen. Le pollen peut être récolté

¹ Le lindane ou γ -HCH est un insecticide chlororganique commercialisé depuis 1938. Également connu sous le nom de γ -hexachlorocyclohexane, il est neurotoxique. Il était utilisé dans l'agriculture et la production pharmaceutique pour traiter la gale et éliminer les poux. Le lindane est une neurotoxine qui interfère avec les fonctions de neurotransmission du GABA; il interagit avec le canal chlorure du récepteur du GABA. Chez l'homme, le lindane s'attaque principalement au système nerveux, au foie et aux reins, et est également susceptible d'être un perturbateur endocrinien. Son utilisation est actuellement interdite dans plus de 50 pays, dont l'Italie.¹⁸² Il est considéré comme un polluant organique persistant et est classé comme cancérigène probable : il a été interdit en Europe en 2006.

sur les abeilles lorsqu'elles reviennent à la ruche (à l'aide d'un système de collecte mécanique spécial) ou dans le miel (si le miel n'est pas filtré et s'il ne provient pas de miellat).

QUELQUES INDICATIONS POUR LA BIOSURVEILLANCE

En fonction des informations à collecter, différentes méthodes d'échantillonnage seront utilisées, en tenant compte de nombreux facteurs. Par exemple :

- Si l'on souhaite étudier les causes de la mort des abeilles, il peut être utile de sortir de la ruche les abeilles mortes retirées des ouvrières.

- Pour mesurer les contaminants présents dans le pollen, il est conseillé de le prélever sur les abeilles butineuses lors de leur retour à la ruche plutôt que dans les cellules des rayons, car il peut avoir échangé des polluants avec la cire ou avoir été exposé à des traitements effectués par les apiculteurs (par exemple, fumigation libérant des HAP et des métaux, ou acaricides utilisés pour traiter le *Varroa*). Jusqu'à ce qu'il soit introduit dans la ruche, le pollen est un bon indicateur des traitements effectués par les agriculteurs. Il convient également de souligner qu'il s'agit de la principale nourriture des stades juvéniles des abeilles.

- La cire doit être utilisée pour détecter les traitements pesticides effectués par les agriculteurs et les apiculteurs, même dans les mois précédents ou l'année précédente ; pour certaines molécules hydrophiles, le miel est préférable (par exemple, les insecticides néonicotinoïdes tels que l'imidaclopride). Le pollen et les abeilles mortes peuvent être utilisés pour détecter les traitements effectués par les agriculteurs quelques jours auparavant.

- Afin d'évaluer la variation de la présence de radionucléides dans le temps (au fil des mois et des années), il est conseillé d'utiliser de la cire provenant de ruches sédentaires où elle ne doit pas être recyclée.

- La cire et la propolis doivent être utilisées pour surveiller les hydrocarbures aromatiques polycycliques.

- La propolis, la cire et le miel de miellat peuvent être utilisés pour contrôler la présence de métaux. Si l'objectif est également d'évaluer la sécurité et la salubrité des aliments, il sera nécessaire de mesurer les concentrations de contaminants tels que les métaux et les pesticides également dans le miel.

- S'il est utile de disposer d'informations sur les espèces végétales visitées par les abeilles, les investigations peuvent être complétées par l'identification des types de pollen transportés par les abeilles. D'une manière générale, l'analyse mélikso-palinologique fournira des informations sur la zone géographique visitée par les abeilles pour récolter du nectar et produire du miel, et permettra de connaître les espèces qui ont été contaminées, y compris dans le miel. Le pollen peut être récolté par les abeilles lors de leur retour à la ruche ou dans les cellules et est également contenu dans le miel.

- Pour connaître l'identité du miel et son origine géographique, comme on vient de le souligner, il sera possible de procéder à une analyse mélikso-palinologique. Si cette recherche n'est pas possible (par exemple : le miel a été filtré ou provient de miellat), en examinant le profil des concentrations de métaux ou d'hydrocarbures aromatiques polycycliques et en les comparant avec un échantillon de miel témoin, il sera possible de déterminer la similitude et donc l'origine.^{44, 62} Dans certains cas, l'examen du profil des métaux ou des hydrocarbures aromatiques polycycliques dans le miel peut suffire, même sans miel de référence, à vérifier la zone d'origine ou à effectuer des comparaisons.

ÉCHANTILLONS DE MIEL

Le miel n'est pas un bon indicateur de la contamination par les métaux, les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et les pesticides. Le miel est dérivé du nectar, qui est une substance sucrée et a donc peu d'affinité pour les HAP, qui sont généralement hydrophobes et ne se bioaccumulent donc pas.⁶⁰ Le miel peut contenir des pesticides hydrosolubles tels que certains insecticides (néonicotinoïdes comme l'imidaclopride, qui est persistant).⁷⁶ L'examen de la concentration de substances dangereuses dans le miel est important, même si elles ne sont pas bioconcentrées, car il s'agit d'un aliment. En outre, les échantillons de miel provenant de différentes zones agricoles contiennent différents pesticides, ce qui confirme la possibilité d'utiliser le miel pour obtenir des informations sur les molécules utilisées par les agriculteurs et les apiculteurs.⁵⁸ Il sera possible de choisir entre le miel "jeune" et le miel plus âgé. Le miel de certaines espèces végétales est plus adapté que d'autres à la biosurveillance en raison de la capacité de certaines plantes à accumuler plus facilement certaines molécules. Le miel est récolté pendant de nombreux jours sur une grande surface et fournit donc une indication spatio-temporelle plus étendue que, par exemple, l'utilisation des abeilles butineuses.

Le miel de miellat est un bio-indicateur très intéressant car il a la capacité d'accumuler des substances (par exemple des pesticides, des hydrocarbures aromatiques polycycliques, des isotopes radioactifs et des métaux) plus facilement car la chaîne alimentaire implique un passage entre la plante et les pucerons avant d'atteindre les abeilles. Les facteurs de bioconcentration peuvent être 10 à 100 fois plus élevés en raison du passage par un niveau trophique supplémentaire. Il est également important de rappeler que le miel de miellat ne contient pas de pollen.

ÉCHANTILLONS DE CIRE

La cire est constituée d'hydrocarbures, d'acides gras et d'esters, qui sont des substances chimiquement stables et résistantes à l'hydrolyse, à l'oxydation, à l'attaque des acides organiques et des sucs gastriques.⁷⁰ La cire peut rester dans la ruche pendant des années et les apiculteurs ont l'habitude de la recycler en la faisant fondre. La cire brute prélevée sur une ruche peut être traitée à l'aide de différents systèmes de fusion pour produire des feuilles de cire, qui sont utilisées pour l'apiculture elle-même.

Des échantillons de cire peuvent être obtenus à partir de plusieurs colonies, dont on extrait un morceau de 10 cm x 10 cm ou un poids de 10-20 g (2 g seront utilisés pour les déterminations analytiques en laboratoire). Dans certains cas, la cire peut également être prélevée sur des échantillons de miel, comme le miel commercialisé avec de la cire.

Parmi les produits de la ruche, la cire d'abeille est sans doute la matrice dans laquelle se concentrent le plus les polluants et les contaminants rejetés dans l'environnement, notamment les pesticides utilisés en agriculture : en particulier les molécules lipophiles. Les principes actifs des pesticides sont souvent hydrophobes (ils n'aiment pas l'eau), peu volatils et persistants, et ont tendance à s'absorber et à s'accumuler dans les matrices lipidiques telles que la cire d'abeille. La cire d'abeille est la meilleure matrice parmi les produits apicoles pour obtenir des informations sur les traitements phytosanitaires effectués sur le terrain et par les apiculteurs, même des mois à l'avance. Les médicaments utilisés par les apiculteurs et les pesticides peuvent rester dans la cire pendant des années et fournissent donc des informations sur les traitements illégaux effectués par les apiculteurs et les agriculteurs.^{55, 107}

La cire peut fournir des informations différentes en fonction de son âge. La cire vierge peut être 18 fois moins contaminée par les pesticides que la cire recyclée par les apiculteurs.⁵⁴ Le Coumaphos (acaricide utilisé par les apiculteurs contre l'acarien *Varroa*) se retrouve en concentrations élevées dans la cire même 6 mois après le traitement de la colonie (529 µg/kg).⁶⁸

Des études ont montré que la cire peut libérer des substances absorbées par les substrats qu'elle contient dans la ruche, comme le pollen, le miel ou les larves, et vice versa. Si la cire est prélevée après que le pollen a été stocké dans les cellules, elle peut également avoir absorbé certains polluants contenus dans le pollen.⁵⁴ Dans la cire, le coumaphos est présent à une concentration plus de 1.000 fois supérieure à celle du miel.³⁵ Naturellement, plus la concentration du pesticide dans la cire est élevée, plus il peut être absorbé facilement par le miel ou les larves.

Certains principes actifs comme le coumaphos ne sont pas réduits par le traitement thermique de 2 heures à 140°C appliqué pour recycler la cire ; de plus, cet acaricide a une demi-vie qui peut varier entre 115 et 346 jours.⁵⁷ Les résultats de certaines biosurveillances montrent que la cire est souvent contaminée principalement par les acaricides utilisés par les apiculteurs et, dans une moindre mesure, par les insecticides et fongicides utilisés dans les champs. Des résidus de certains principes actifs d'acaricides largement utilisés par les apiculteurs en Suisse (et ailleurs) sont retrouvés dans les cires traitées à haute température (bromopropylate, coumaphos, fluvalinate, fluméthrine et thymol).⁷⁰ La pratique du recyclage de la cire par les apiculteurs comporte donc un risque accru pour les abeilles, car certaines molécules restent dans la ruche et s'accumulent.⁶⁸

La cire, comme déjà mentionné, est la matrice la plus contaminée par les pesticides en termes de quantité, alors que le pollen contient plus de molécules de pesticides. Les échantillons provenant d'abeilles vivantes sont moins contaminés que la cire, confirmant la meilleure représentativité de la pollution par la cire. En conclusion, la cire fraîchement fabriquée par les abeilles fournit des informations à court terme, tandis que la cire ancienne, telle que celle recyclée par les apiculteurs, peut fournir des informations sur la contamination reçue des mois ou des années auparavant.

ÉCHANTILLONS D'ABEILLES

Les abeilles vivantes peuvent être un indicateur des molécules aéroportées absorbées par contact mais aussi par ingestion, comme les métaux, les pesticides et les organofluorés. De nombreuses études détectent des polluants à des concentrations plus faibles que dans le pollen et la cire. Si on choisit d'utiliser des abeilles, il est conseillé de prendre des individus du même âge et de la même caste pour chaque échantillon. Certains contaminants sont distribués différemment selon les stades et les castes. Par exemple, les polluants atmosphériques peuvent être mesurés chez les abeilles en quête de nourriture, tandis que les larves peuvent être plus sensibles à certains pesticides. Quant aux abeilles, on peut en collecter 20 ou 50 par ruche. Cent cinquante spécimens peuvent être collectés par station de surveillance, c'est-à-dire dans trois ruches, dont 50 sont prélevées dans chacune. Les abeilles seront lavées si l'on veut mesurer la concentration de pesticides et de métaux à l'extérieur du corps (les substances sont extraites de la surface du corps avec un solvant afin d'analyser leur concentration). Les composés hydrophobes sont plus susceptibles de se trouver à l'intérieur du corps des abeilles, tandis que les composés hydrophiles sont plus susceptibles de se trouver à l'extérieur.⁴⁷ Le corps des abeilles sera homogénéisé afin de mesurer la concentration à l'intérieur du corps ; les contaminants peuvent être extraits sélectivement et recherchés uniquement dans une partie du corps comme l'abdomen, qui contient la majeure partie de l'hémolymphe (celle-ci n'a pas pour fonction de transporter l'oxygène comme dans le sang, mais a pour fonction de transporter les nutriments). Avant d'être congelées, les abeilles doivent être nettoyées du pollen, dans les sacs des pattes arrière et sur le corps. En outre, les abeilles transportent le nectar dans leur tube digestif, de sorte que l'analyse des abeilles fournit également des informations sur le nectar. Pour obtenir plus d'informations, les différentes parties anatomiques de l'abeille (par exemple

l'abdomen) peuvent être séparées et le contenu externe du corps examiné après lavage avec des solvants, et le contenu interne après nettoyage de la partie externe. Les abeilles fraîchement collectées doivent être stockées à -20°C jusqu'à leur analyse.

Chez les abeilles mortes, il est possible d'essayer de rechercher les causes des effets létaux tels que les insecticides-acaricides ou d'autres contaminants anthropiques. On peut prélever entre 2 et 5 g d'abeilles mortes par échantillon, sachant que le poids de chaque abeille est d'environ 90 mg (entre 60 et 110 mg), ce qui revient à collecter entre 20 et 55 abeilles. Si l'abeille vient de récolter du nectar et du pollen, elle peut peser environ 150 mg. Comme déjà expliqué, si les abeilles ne sont pas débarrassées du pollen et si elles ont récolté du nectar, cela indiquera une contamination des trois matrices : pollen, nectar et insecte.

ÉCHANTILLONS DE POLLEN

Le pollen peut être collecté par les abeilles butineuses qui reviennent à la ruche à l'aide de systèmes de piégeage mécaniques spéciaux, à placer à l'entrée de la ruche à partir de trois jours et jusqu'à une semaine avant la collecte des échantillons. La collecte peut s'effectuer pendant quelques jours et jusqu'à plusieurs dizaines de grammes de pollen. Le pollen peut également être récolté dans les cellules de la ruche. Lorsque le pollen est collecté auprès des abeilles qui retournent à la ruche, on obtient des informations sur la contamination de l'environnement, notamment par les pesticides utilisés par les agriculteurs. Toutefois, si le pollen est collecté après avoir été stocké pendant des semaines dans les cellules, il permettra également de mesurer la contamination par les pesticides générée par les apiculteurs. En outre, lorsqu'ils sont en contact dans les cellules, le pollen et la cire peuvent échanger des molécules, de sorte que le pollen peut être contaminé par certaines molécules contenues dans la cire. Si on ne dispose pas de beaucoup de ressources pour effectuer des analyses chimiques des pesticides, on peut proposer de les mesurer dans le pollen stocké dans les peignes. Le pollen contient généralement plus de principes actifs que la cire, bien que cette dernière présente les plus fortes concentrations, notamment de molécules utilisées par les apiculteurs.

De nombreuses études montrent une contamination dangereuse du pollen par les pesticides utilisés en agriculture, mais il existe peu d'informations sur la contamination de la partie femelle des fleurs.

ANALYSE PALYNOLOGIQUE ET CHIMIQUE POUR IDENTIFIER L'ORIGINE GÉOGRAPHIQUE

Afin de déterminer l'aire géographique et florale du miel, il est possible de cataloguer les types de pollen contenus dans le miel : c'est l'analyse méliko-palinologique. Il faut savoir qu'entre 100 et 100.000 grains de pollen peuvent être naturellement présents dans chaque gramme de miel. La reconnaissance des espèces de pollen collectées par les sacs d'abeilles et celles contenues dans le miel permet de déterminer quelles plantes ont été visitées par les insectes. En examinant la composition du pollen, c'est-à-dire en identifiant l'espèce à laquelle il appartient à l'aide d'un microscope optique et d'atlas polliniques, il est possible de retrouver les sites les plus fréquentés. L'examen de la composition du pollen permet également de retracer tout comportement illégal tel que la distribution de pesticides pendant la floraison ou l'utilisation de substances interdites (par exemple, des pesticides non autorisés sur une culture particulière). La détermination de l'origine végétale du pollen permet de détecter d'éventuelles fraudes commerciales : miel classé à tort en châtaignier au lieu de mille-fleurs. Le miel de miellat ne contient pas de pollen, et les apiculteurs peuvent avoir filtré le miel. Dans ce cas, il n'est pas

possible de retracer l'origine florale. En outre, on peut procéder à un mélange ou à une addition artificielle de pollen.

Comme nous l'avons déjà mentionné, lorsque le pollen est collecté par les abeilles dès leur retour à la ruche, il s'agit d'un indicateur de contamination agricole, comme les pesticides utilisés dans les champs. Si elle est recueillie à l'intérieur des cellules de la ruche, elle peut également contenir des molécules utilisées par les apiculteurs et celles libérées par la cire.

Grâce à des systèmes mécaniques spéciaux installés à l'entrée de la ruche, il est possible de collecter le pollen des abeilles qui reviennent. Lorsque les abeilles reviennent à la ruche, un système simple vide les sacs situés dans les pattes arrière des abeilles ouvrières dans un récipient spécial. De cette manière, le pollen fraîchement récolté peut être collecté et non traité par les abeilles. Le pollen peut également être collecté à l'intérieur de la ruche, dans les cellules où il est stocké ou dans le miel s'il n'a pas été filtré. Pour identifier les espèces végétales visitées par les abeilles, il suffit d'examiner 300 grains de pollen. L'analyse du contenu pollinique est effectuée au microscope optique à l'aide d'atlas spéciaux de mélikso-palinologie.⁷⁸

Un miel est considéré comme monofloral lorsqu'au moins 45% du pollen provient d'une seule espèce botanique. Il existe des exceptions, comme le miel de châtaignier, qui doit contenir au moins 90% de pollen de cette espèce. Pour que le miel d'acacia soit défini comme monofloral, il suffit qu'il contienne 15% de pollen de cette espèce.

Il est possible, avec plus de difficulté, de retracer l'origine géographique du miel en examinant le profil des métaux, des hydrocarbures aromatiques polycycliques et des radionucléides.¹ Cependant, ces méthodes peuvent nécessiter des échantillons de référence à comparer et sont beaucoup plus coûteuses.

MATRICES ENVIRONNEMENTALES DE COMPARAISON

Le miel, la cire, les abeilles, le pollen ne sont pas équivalents pour fournir des informations sur les différents polluants tels que les pesticides ou les métaux. Le pollen et la cire sont les matrices les plus appropriées s'il est nécessaire de collecter des informations sur les pesticides. Le pollen transporté par les abeilles représente la contamination des plantes visitées tandis que la cire fournit également des informations sur les produits utilisés par les apiculteurs, même l'année précédente. La cire est la matrice où l'on peut obtenir plus d'informations sur les hydrocarbures aromatiques polycycliques et les radionucléides. La propolis peut également être utilisée pour obtenir des informations sur les hydrocarbures aromatiques polycycliques et les radionucléides. À cet égard, les abeilles et le miel fournissent moins d'informations, car les contrôles montrent que les concentrations et le nombre de pesticides et d'hydrocarbures aromatiques polycycliques sont plus faibles. Le miel de miellat fait exception à la règle.

Il est juste de souligner que d'autres matrices peuvent être plus représentatives du niveau de contamination de l'environnement que les produits apicoles, car elles peuvent contenir des concentrations plus élevées. Pour obtenir des informations sur la contamination par les métaux, il faut envisager d'examiner les concentrations de métaux dans le sol et dans les plantes qui les bioaccumulent, alors que les hydrocarbures aromatiques polycycliques sont bien représentés dans les feuilles.

Les informations obtenues à partir des produits apicoles peuvent être comparées à celles obtenues à partir de matrices environnementales telles que les concentrations dans les fleurs, le sol, l'eau et l'air. Par exemple, pour la détection des métaux, trois aliquotes de sol (100 g,

¹ Le miel est également classé en fonction de sa conductivité électrique (elle doit être supérieure à 1,0 mS/cm).¹⁷

provenant des 10 premiers cm) peuvent être prélevés dans un rayon de 400 à 600 m des ruches et mélangés pour former un seul échantillon. Il sera possible d'échantillonner :

- les feuilles des plantes pour obtenir des informations sur les métaux et les hydrocarbures aromatiques polycycliques ;
- les fleurs, l'eau et le sol pour les métaux (et les radionucléides) et les produits phytosanitaires.

Lorsque le but de la surveillance est d'obtenir des informations sur la contamination des métaux dans le sol, certaines études révèlent que la concentration mesurée dans les fleurs d'acacia et de tournesol est un meilleur indicateur que le miel, car elles les bioconcentrent.⁴⁴ Afin d'obtenir des informations sur les radionucléides, il est possible d'échantillonner les feuilles de conifères (jeunes aiguilles) qui peuvent être prélevées sur 25-30 arbres.⁵⁹

Les produits apicoles ne fournissent pas nécessairement de meilleures informations que d'autres matrices environnementales. Cela dépend de l'objectif de la biosurveillance, qui devrait en tout cas évaluer, à un stade préliminaire, des alternatives à l'utilisation de techniques analytiques coûteuses sur les produits apicoles.

APTITUDE DE DIFFÉRENTS PRODUITS APICOLES À LA BIOSURVEILLANCE

Quelques informations sur la capacité différente des différentes matrices à fournir des informations sur certains polluants environnementaux sont résumées. Ces indications, extrapolées à partir de différentes recherches, permettent d'affirmer que les métaux ne s'accumulent généralement pas dans les produits apicoles : il est préférable de rechercher ces contaminants directement dans le sol ou dans les tissus végétaux qui les bioaccumulent, à moins que l'on ne veuille évaluer un risque pour la sécurité alimentaire (par exemple, les métaux dans le miel) ou pour la santé des abeilles.^{65, 72} Il est possible d'essayer de généraliser, avec la prudence qui s'impose, que les métaux peuvent être trouvés dans différentes matrices dans l'ordre décroissant de concentration suivant (par exemple, le cadmium, le chrome et le plomb) :

^{176, 72}

sol > fleurs (pollen) > abeilles > eau ≥ miel issu du nectar.

Il convient de remarquer que de nombreuses plantes sont capables de bioaccumuler, dans certains tissus, des métaux présents dans le sol, et peuvent donc enregistrer des concentrations plus élevées que dans le sol (par exemple : les fleurs d'acacia bioconcentrent jusqu'à 14 fois le potassium, 11 fois le phosphore, 8 fois le soufre, 5 fois le bore et 3 fois le molybdène, de sorte qu'elles peuvent être utilisées pour obtenir des nutriments (par exemple, les fleurs d'acacia bioconcentrent plus de 14 fois le potassium, 11 fois le phosphore, 8 fois le soufre, 5 fois le bore et 3 fois le molybdène, elles peuvent donc être utilisées pour obtenir des informations sur ces métaux dans le sol ; les fleurs de tournesol bioconcentrent plus de 22 fois le bore, 8 fois le soufre, 6 fois le potassium, 3 fois le phosphore et 3 fois le molybdène par rapport aux concentrations enregistrées dans le sol).⁴⁴

Les abeilles peuvent enregistrer des concentrations plus élevées de métaux libérés dans l'atmosphère que le miel. Il peut être utile de disposer d'indications générales, même si elles ne sont pas valables pour toutes les conditions possibles ; par exemple, les rapports entre les concentrations de métaux mesurées dans différentes matrices seront influencés par le type de source de contamination, comme les rejets atmosphériques plutôt que les rejets dans l'eau ou les engrais contaminant le sol (par exemple, les métaux dans les boues des stations d'épuration des eaux ou le compost des déchets solides municipaux et des déchets industriels). Il est important

de considérer que des éléments tels que le cuivre, le manganèse, l'arsenic et l'aluminium sont également des composants des pesticides, ce qui peut constituer une autre source de contamination. Le cadmium et le plomb peuvent provenir des engrais, des eaux usées, des effluents industriels et des combustibles fossiles, par le biais des dépôts atmosphériques. Dans certaines conditions, les concentrations mesurées dans le miel peuvent être plus élevées que celles mesurées dans l'eau (par exemple, les métaux provenant de la pollution atmosphérique). La recherche de métaux dans l'eau est utile pour l'évaluation des risques sanitaires (par exemple pour l'eau potable) ou pour d'autres types d'enquêtes comme celles sur les conséquences des rejets d'eaux usées ou des activités industrielles. Par conséquent, le niveau de concentration suggéré et les indications données dans le tableau ci-dessous ne peuvent pas être appliqués pour tous les métaux et dans toutes les conditions possibles, mais le message que nous voulons souligner est le suivant : les produits apicoles ne sont pas la matrice la plus appropriée pour les études de biosurveillance de la contamination environnementale par les métaux (pour donner un exemple, les concentrations les plus élevées de plomb libéré dans l'atmosphère se trouvent dans le sol, si on les compare à celles mesurées dans les produits apicoles).^{708, 732} La recherche de métaux peut avoir différents objectifs, comme l'étude des augmentations de la mortalité ou l'identification géographique sur la base des relations entre les différentes concentrations.⁶²

Pour prendre un autre exemple, la cire est probablement l'une des meilleures matrices pouvant être utilisées pour obtenir des informations sur l'utilisation par les apiculteurs. En outre, le pollen stocké dans la ruche, en plus d'enregistrer la contamination causée par l'apiculteur, pourra fournir des informations sur les pesticides utilisés par les agriculteurs (par exemple pendant la floraison).

En ce qui concerne les hydrocarbures aromatiques polycycliques, il est intéressant de remarquer un résultat surprenant. Ces substances peuvent être trouvées en concentrations élevées dans la propolis parce que les abeilles, au lieu de collecter la résine des plantes (comme les conifères), collectent les hydrocarbures et les substances gommeuses de l'asphalte et du goudron, ou des peintures.^{59, 60, 974} En l'absence de résines végétales, telles que celles produites par les aiguilles de pin, les abeilles ont appris à utiliser l'asphalte et le goudron, qui contiennent divers hydrocarbures aromatiques polycycliques (ou HAP).

Certains types de pollen peuvent contenir jusqu'à 25,4% de lipides (par exemple, la plante *Brassica napus*) et, par conséquent, les HAP peuvent s'y accumuler facilement car ils sont lipophiles.

Le tableau suivant propose différentes gradations d'adéquation de différentes matrices pour la détection de certaines catégories de substances. Dans la phase de planification d'une biosurveillance, toutes les variables doivent être examinées pour atteindre l'objectif requis et il est important de remarquer que les indications données dans le tableau ci-dessous peuvent ne pas être les plus représentatives de conditions particulières. Afin d'économiser du temps et des ressources, avant de réaliser une biosurveillance, il faut essayer de prévoir comment les polluants sont distribués dans l'environnement afin de pouvoir identifier les matrices où ils sont concentrés et, par conséquent, dans lesquelles il est plus facile de les identifier.

	Pesticides	IPA	Métaux
Abeilles vivantes	II ^A	I	II ^A
Abeilles mortes	II ^A	I	II ^A
Miel de nectar	I ^B	I	I
Miel de miellat^D	II	II	II
Pollen^C	III	II	II
Cire^E	III (lipophile)	III	II
Propolis	X	III	II
Sol	X	III	III
Air	--	II	II
Eau	II	II	II
Végétaux	III	III (par exemple, les feuilles)	III (par exemple, les fleurs)
Lichens	II	II	III

Légende :

HAP = hydrocarbures aromatiques polycycliques.

Représentativité de la matrice :

I = ne convient que dans certains cas (par exemple, des échantillons de comparaison sont nécessaires ; des informations sur la sécurité alimentaire ou la capacité de bioaccumulation peuvent être disponibles).

II = bon.

III = très bonne matrice pour le type d'enquête. Dans ce type de matrice, les concentrations les plus élevées peuvent être détectées.

X = matrice vraisemblablement appropriée, bien qu'aucune information à ce sujet n'ait été examinée dans la littérature scientifique.

^A Ils révèlent une contamination qui s'est produite il y a seulement quelques jours. Certains pesticides persistants et bioaccumulatifs peuvent présenter des concentrations plus élevées dans les abeilles vivantes que dans le sol et les fleurs.

^B Le nectar se compose principalement d'eau et de sucre, de sorte que des pesticides hydrosolubles tels que certains néonicotinoïdes (imidaclopride) et le lindane peuvent s'y trouver. ^{45, 182} Le miel n'est pas une matrice appropriée pour la détection des pesticides lipophiles.

^C Le pollen, s'il est collecté avant que les abeilles n'entrent dans la ruche, peut fournir des informations sur la contamination des plantes. S'il est collecté après avoir été stocké dans les alvéoles, il peut également avoir été contaminé par les produits contenus dans la cire et ceux utilisés par les apiculteurs. Le fer, le zinc et le magnésium sont des métaux essentiels, il est donc possible de les trouver en forte concentration dans le pollen.

^D Bioconcentration plus élevée en raison des pucerons.

^E La cire vierge sera moins contaminée que la vieille cire ou la cire recyclée par les apiculteurs. Ce dernier aura donc un souvenir de ce qui s'est passé plus d'un an auparavant.

BIOSURVEILLANCE ET GRADIENTS DE CONCENTRATION DE POLLUANTS DANS L'ENVIRONNEMENT

En examinant les gradients de concentration de polluants (par exemple les métaux) mesurés dans les produits des abeilles provenant de ruches situées sur différents sites, il est possible d'obtenir des informations sur les sources de contamination les plus probables (par exemple les autoroutes, les industries textiles).¹⁷ Les différentes concentrations enregistrées dans les ruches situées sur différents sites et le gradient que l'on peut obtenir peuvent suggérer la provenance des polluants. En comparant la variation des concentrations dans le temps sur différents sites, il est possible d'identifier la zone d'où provient le contaminant étudié (par exemple, usine, décharge, agriculteur). La présence de certains polluants est souvent associée à d'autres, et ces informations peuvent également fournir des indications utiles.

En cas d'accidents ou d'explosions nucléaires (essais d'armes nucléaires réalisés dans l'air ou dans le sol, par exemple), il est possible d'enregistrer la variation dans l'espace et dans le temps des différents isotopes radioactifs, même à des centaines ou des milliers de kilomètres.

ÉCHANTILLONNAGE DE PRODUITS APICOLES

Les échantillons doivent être manipulés de manière appropriée et analysés le plus rapidement possible après leur prélèvement, de préférence dans les 48 heures. En général, les échantillons doivent être conservés à moins de -20°C jusqu'à leur analyse. Le miel et la cire peuvent être conservés à +4°C et dans l'obscurité pendant quelques jours.⁷¹ Il faut souligner que certains pesticides sont rapidement transformés en métabolites qui, dans certains cas, sont aussi ou plus toxiques que les molécules de départ, beaucoup plus persistants mais difficiles à déterminer.

Pour l'échantillonnage, il est conseillé de prélever des échantillons de plusieurs ruches (au moins 2 ou mieux de 5 ruches par rucher ou station de surveillance) et de suivre deux procédures possibles :

- 1) Mélanger les échantillons et les analyser ensemble. On peut utiliser 100 g de miel, ou de cire, ou quelques grammes de pollen.
- 2) Prélever plusieurs échantillons dans la même station de surveillance, c'est-à-dire dans 2 et jusqu'à 5 ruches, et analyser les échantillons séparément, sans les mélanger. Le résultat final peut être obtenu comme une moyenne de 3 ou 5 échantillons. Cette procédure peut être utilisée pour des méthodes d'analyse moins coûteuses, comme la mesure de la présence de radionucléides (isotopes radioactifs).

En général, tous les échantillons tels que le miel, la cire, la propolis et les échantillons d'abeilles seront plus représentatifs s'ils sont obtenus à partir de plusieurs colonies sur le même site (rucher). Quelques grammes de miel, qui peuvent être obtenus à partir de plusieurs échantillons primaires (par exemple 500 g de miel obtenus en mélangeant le miel collecté dans 5 ruches), sont suffisants pour l'analyse en laboratoire. En général, les échantillons obtenus par mélange peuvent peser de quelques dizaines de grammes à quelques centaines de grammes. Du mélange de matrices obtenues à partir de plusieurs colonies d'un même rucher, on extrait l'échantillon destiné au laboratoire, qui peut être de quelques dizaines de grammes (la plupart des techniques analytiques nécessitent moins de 3 g d'échantillon).

PRÉVENTION D'ÉVENTUELLES INTERFÉRENCES

Il faut veiller à utiliser des ruches sans métal si l'on veut contrôler ces substances et ne pas utiliser de fumigations. Les fumigations utilisées par les apiculteurs, pour calmer et étourdir les abeilles lors des inspections des ruches, sont une source de métaux et aussi d'hydrocarbures aromatiques polycycliques. Il doit être interdit aux opérateurs de fumer pendant l'inspection des ruches et le miel doit être extrait à l'aide de systèmes d'extraction lente.

Il faut garder à l'esprit que les peintures et les plastiques peuvent libérer des hydrocarbures aromatiques polycycliques et d'autres substances qui pourraient altérer les résultats d'analyse. Les ruches ne doivent pas être peintes ou traitées avec les molécules recherchées. Les conteneurs d'échantillons ne doivent pas non plus être une source de contamination. Il faut donc prendre soin de considérer et d'exclure tous les facteurs d'interférence possibles. Si l'on décide d'enquêter sur les produits phytosanitaires utilisés sur le terrain, il faut choisir des ruchers fixes et non traités par les apiculteurs, sinon les molécules distribuées par les agriculteurs et celles utilisées par les apiculteurs seront enregistrées en même temps.

Des systèmes d'aspiration et des pièges peuvent être utilisés pour attraper les abeilles, et le froid et la narcose (dioxyde de carbone) peuvent être utilisés pour les immobiliser ou les calmer.¹⁹⁵

MÉTHODES D'ANALYSE EN LABORATOIRE

Diverses techniques telles que la spectrométrie atomique, la spectrométrie d'absorption atomique à flamme et la spectrométrie d'émission atomique à flamme peuvent être utilisées pour examiner les métaux.

Les radionucléides (isotopes radioactifs des métaux) possèdent une énergie dans leur noyau qui les rend instables. Cet excès d'énergie doit être dissipé pour transformer les noyaux instables en noyaux stables, par la libération de nouvelles particules telles que les rayonnements alpha et bêta ou les rayonnements gamma. Différents radionucléides émettent des rayons gamma avec différents niveaux d'énergie (entre 15 keV et 10 MeV). En mesurant l'émission de rayons gamma, il est possible d'obtenir des informations qualitatives (la nature du radionucléide qui les émet) et quantitatives (la concentration). L'étude du spectre du rayonnement gamma permet donc d'obtenir des informations sur le radionucléide. Un spectromètre gamma peut être utilisé pour mesurer les radionucléides, ce qui présente l'avantage de pouvoir être utilisé directement dans des échantillons non traités, par exemple le miel ou les abeilles. La mesure des radionucléides est donc plus facile que celle des métaux ou des pesticides car aucune préparation n'est nécessaire.⁷¹ Les mesures analytiques peuvent être répétées deux à cinq fois pour chaque échantillon afin d'obtenir une meilleure représentation de la concentration (ce qui permet d'évaluer la fiabilité de la méthode). Des échantillons de référence seront utilisés et d'autres procédures seront adoptées pour vérifier la qualité du résultat obtenu.

En parlant de rayonnement, il est utile de rappeler que le rayonnement gamma peut également être utilisé pour stériliser les matériaux infectés, y compris la cire et le miel.³⁵

Le choix de la technique d'analyse influencera les résultats, comme ceux concernant les résidus de substances actives de pesticides, qui peuvent être recherchés à l'aide d'un chromatographe en phase gazeuse suivi d'un spectromètre de masse à triple quadripôle, ou d'une chromatographie liquide à haute pression avec différents types de détecteurs (par exemple, le détecteur FID ou détecteur à ionisation de flamme).⁷⁶

L'UTILISATION DE BIOMARQUEURS MOLÉCULAIRES CHEZ LES ABEILLES

Une autre possibilité, brièvement évoquée, est l'utilisation de biomarqueurs, qui peuvent être définis comme des changements observables et mesurables au niveau moléculaire, cellulaire ou physiologique. Ces biomarqueurs permettent de détecter l'exposition d'un organisme à des xénobiotiques, c'est-à-dire des substances étrangères.⁴³ Les biomarqueurs peuvent être détectés chez des espèces sentinelles et peuvent, par exemple, être des systèmes d'ADN ou d'enzymes et permettent d'obtenir des informations sur l'exposition à des substances toxiques pour le système nerveux comme les métaux ou des informations sur le fonctionnement du métabolisme. Les biomarqueurs enzymatiques (protéines catalytiques) comprennent ceux qui mesurent le niveau de stress oxydatif et ceux qui mesurent les changements dans le système de détoxification (ils sont chargés de transformer les molécules dangereuses en d'autres moins dangereuses et plus faciles à éliminer). Certaines des enzymes dont l'activité peut être mesurée pour détecter les effets délétères sur les abeilles sont les suivantes :

- Phosphatase alcaline et glutathion-S-transférase comme indicateurs métaboliques des processus de détoxification. La glutathion-S-transférase est une enzyme dont l'action est induite par certains contaminants et augmente en présence de pesticides, d'hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), de polychlorobiphényles (PCB) et de métaux.

- L'acétylcholinestérase en tant que biomarqueur du système nerveux (elle est par exemple altérée par les insecticides organophosphorés, les pyréthroïdes et les carbamates). L'acétylcholinestérase peut fournir des informations sur les molécules neurotoxiques comme les insecticides et aussi sur certains métaux : en présence de certaines de ces substances, sa fonction est réduite.

- Les métallothionéines comme biomarqueurs des effets néfastes des métaux. Les métallothionéines dans le système nerveux sont impliquées dans la détoxification de certains métaux qui ont des effets neurotoxiques.⁴²

En mesurant la diminution ou l'augmentation de l'activité de ces protéines, ainsi que la variation de leur concentration, il est possible d'obtenir des informations sur l'état de santé des abeilles et les mécanismes d'action négatifs générés par les polluants, sans détecter l'identité des molécules responsables. Ces effets sont sublétaux (ils ne tuent pas à court terme) et peuvent néanmoins générer des effets désastreux sur la colonie. La mesure et la comparaison de l'activité de ces biomarqueurs permettent d'émettre des hypothèses sur la catégorie de polluant à laquelle les insectes ont été exposés et de distinguer un site pollué d'un autre. Une des limites de cette approche méthodologique est qu'elle nécessite des laboratoires bien équipés et un personnel hautement qualifié. De plus, elle ne permet pas d'identifier les polluants responsables. C'est un peu comme mesurer une fièvre : on a une indication qui, dans la plupart des cas, ne suffit pas à identifier la cause de la maladie.

PESTICIDES : MANIFESTE D'UNE PRODUCTION ALIMENTAIRE NON DURABLE

CERTAINS MÉCANISMES D'ACTION DES PESTICIDES

Les premières traces de l'utilisation d'insecticides pour protéger les cultures remontent probablement à 1000 ans avant Jésus-Christ.¹⁹³ Le mot pesticides est une traduction du mot anglais *pesticides*. En italien, ils sont appelés « prodotti fitosanitari », « antiparassitari », « fitofarmaci » ou « agro-farmaci ». « Prodotti fitosanitari » est une expression qui allège et rend moins visible la finalité de ces produits : anéantir les insectes ou tuer d'autres êtres vivants comme les champignons ou les plantes.¹²⁹⁵ Les pesticides sont des produits chimiques (parfois des micro-organismes ou leurs produits comme les toxines) utilisés en agriculture pour éliminer tout ce qui, du point de vue des agriculteurs, nuit aux plantes cultivées.

Selon leurs caractéristiques chimiques, les pesticides peuvent être classés en différentes catégories : organochlorés, organophosphorés, carbamates, pyréthroïdes, phénoxy-sidérivés, triazines et amides. Ils sont également classés en fonction de leur mécanisme d'action. Par exemple, les insecticides organochlorés, organophosphorés et pyréthroïdes agissent essentiellement comme des neurotoxines. Certains herbicides (phénoxyderivatifs) agissent comme des hormones végétales (par exemple, les auxines), certains fongicides (dithiocarbamates) altèrent les processus énergétiques et génèrent un stress oxydatif au niveau cellulaire.

Les premiers pesticides utilisés étaient des pesticides inorganiques à base de sulfate de cuivre ou d'arsenic. En 1881, la première mort d'abeilles a été enregistrée en raison de l'utilisation d'un insecticide, à base d'arsenic, dans les champs de prunes.⁹⁷⁴ Dans les années 40, les pesticides organochlorés, dont le célèbre DDT, sont apparus, suivis des organophosphorés, encore plus dangereux pour les abeilles. Suite à l'utilisation massive de ces molécules, des insectes résistants sont apparus et l'industrie chimique a mis les carbamates sur le marché. Ces derniers se sont rapidement révélés très toxiques pour les abeilles. En 1967, par exemple, le carbaryl (dérivé de l'acide carbamique) a tué 70.000 colonies en Amérique du Nord lorsqu'il était utilisé sur le coton et 33.000 colonies lorsqu'il était utilisé sur le maïs (sur 700.000 colonies).^{243, 249} Peu après, sont apparus sur le marché les pyréthrinoïdes, insecticides qui sont des produits de synthèse inspirés des pyréthrines naturelles des fleurs, et les perturbateurs endocriniens des arthropodes, qui empêchent la formation normale de chitine dans l'exosquelette des insectes (comme le diflubenzuron qui est un insecticide de la classe des benzoylurées). Dans la nature, la chitine est la biomolécule la plus abondante après la cellulose.

Dans les années 1990, les insecticides néonicotinoïdes et le phénylpyrazole (fipronil) sont arrivés.²⁵⁰ Quelques grammes de néonicotinoïdes (par exemple, l'imidaclopride) suffisent à protéger un hectare de culture contre les insectes (par exemple, les hannetons).

Au fil du temps, les molécules utilisées en agriculture se sont révélées efficaces à des doses plus faibles, et certaines se sont avérées très persistantes dans l'environnement. L'histoire se répète : les insectes développent une résistance même aux nouveaux pesticides plus toxiques tels que les néonicotinoïdes. On peut citer le puceron du coton (*Aphis gossypii*) qui est devenu résistant à l'imidaclopride et à l'acétamipride, le doryphore de la pomme de terre (*Leptinotarsa decemlineata*, un coléoptère parasite) et un ravageur du riz (*Nilaparvata lugens*) qui est devenu résistant aux néonicotinoïdes.⁴¹⁵

Les pesticides, en fonction de l'organisme contre lequel ils sont utilisés, peuvent être classés dans les catégories suivantes : ²⁵

- Les insecticides qui sont utilisés pour tuer les insectes considérés comme nuisibles aux cultures agricoles (comme les pucerons et les cochenilles), mais aussi pour lutter contre les insectes nuisibles ou porteurs de maladies pour les humains ou les animaux domestiques.
- Les fongicides ou champignons qui combattent les maladies causées par des champignons.
- Les herbicides utilisés pour détruire les mauvaises herbes (y compris les défoliants).
- Les nématicides qui exterminent les vers ou les nématodes.
- Les acaricides qui tuent les acariens et autres arachnides.
- Les régulateurs de croissance végétale sont des hormones végétales utilisées pour réguler la croissance des cultures.

Les insecticides sont également classés en fonction du site où ils agissent : ¹⁹³

- Les carbamates (par exemple, le chlorhydrate de propomocarbe, l'oxamyl) et les organophosphorés (par exemple, l'acéphate, le chlorpyrifos, le diazinon, le diméthoate, le fénitrothion) sont des inhibiteurs de l'acétylcholinestérase.
- Les pyréthroïdes (par exemple, la cyperméthrine, la cyfluthrine, la deltaméthrine) modulent les canaux sodiques.
- Les néonicotinoïdes (par exemple l'acétamipride, la clothianidine, l'imidaclopride, le thiamétoxam) sont des agonistes des récepteurs de l'acétylcholine.

Malheureusement, la molécule sélective, c'est-à-dire celle qui ne peut tuer que l'espèce cible, celle que l'agriculteur considère comme un ennemi, n'existe pas. ¹¹⁷⁵ Toutes les molécules agissent négativement sur les organismes non ciblés et présentent souvent des actions complètement différentes de celles pour lesquelles elles sont utilisées. Ainsi, par exemple, on a constaté que les herbicides agissent également comme des antibiotiques et les insecticides comme des hormones (perturbateurs endocriniens). En outre, de nombreux insecticides n'ont aucun effet répulsif sur les abeilles, qui préfèrent même consommer une solution sucrée enrichie en pesticides, comme l'herbicide glyphosate ou le fongicide chlortalonil. ⁷¹⁸ Ce comportement anormal favorise une exposition nocive et des effets synergiques.

En Amérique du Nord, une enquête de quatre ans (2009-2012) sur les produits apicoles provenant de ruchers fixes dans six États a permis de trouver 82 pesticides, huit métabolites et une molécule synergique dans 168 échantillons de pollen et 142 échantillons de cire. ¹²⁰³ Sur les 91 molécules trouvées, 38 (42%) sont des insecticides, 29 (32%) des fongicides et 23 (25%) des herbicides. 78 pesticides ont été trouvés dans le pollen (32 ont été trouvés uniquement dans cette matrice), 58 dans la cire (12 ont été trouvés uniquement dans cette matrice). Sur les 91 molécules trouvées, des informations sur les doses létales par contact et par ingestion ne sont disponibles que pour 51 d'entre elles. Les mécanismes d'action de certains pesticides trouvés dans les produits apicoles en Amérique du Nord sont résumés ci-dessous. Il est essentiel de souligner le pouvoir destructeur de ces molécules car elles altèrent des mécanismes essentiels au fonctionnement de tous les êtres vivants. Il s'agit de réactions biochimiques et de fonctions physiologiques sur lesquelles repose l'essence de la vie, comme la synthèse des lipides, des protéines, la transmission nerveuse, la division cellulaire, la photosynthèse ou la régulation de la croissance. Nous distribuons systématiquement dans l'environnement des tonnes de molécules chimiques capables d'endommager des réactions biochimiques omniprésentes et fondamentales à des concentrations infinitésimales : elles inhibent la synthèse des acides nucléiques (ADN ou ARN), altèrent la transmission nerveuse, inhibent la reproduction cellulaire et endommagent le mécanisme de la photosynthèse. C'est une attaque aussi insensée que suicidaire. Les molécules persistantes et bioaccumulatives capables de modifier de manière irréversible les fondements de l'essence de la vie doivent être interdites sans délai.

Mécanismes d'action des pesticides présents dans la cire et le pollen en Amérique du Nord

Fongicides ¹²⁰³

- Altération de la synthèse des acides nucléiques : béalaxyl, métalaxyl, othilone.
- Altération du processus de division cellulaire (effets sur l'assemblage de la protéine bêta-tubuline pendant la mitose) : carbendazime, thiabendazole, thiophanate-méthyle.
- Altération de la biochimie de la respiration complexe II (succinate-déshydrogénase) : boscalid ; complexe III (cytochrome bc1) : azoxystrobine, fluoxastrobine, pyraclostrobine, trifloxystrobine ; (découpleur de la phosphorylation oxydative) : fluazinam.
- Altération de la synthèse des acides aminés et des protéines (par exemple, synthèse de la méthionine) ; cyprodinil, pyriméthanol.
- Altération des modulateurs de signaux (MAP/Histidine-kinase dans la transduction du signal osmotique) : iprodione.
- Perturbation de la biosynthèse des lipides membranaires : difénoconazole, époxiconazole, fenbuconazole, imazalil, metconazole, myclobutanil, propiconazole-1, tebuconazole (C14-déméthylase dans la biosynthèse des stérols) ; spiroxamine (D14-réductase et D8-D7-isomérase dans la biosynthèse des stérols).
- Altération du processus de synthèse de la paroi cellulaire chez les plantes (cellulose) : diméthomorphe, mandipropamid.
- Action sur de nombreux sites : chlorothalonil.
- Mode d'action inconnu : cymoxanil, diphénylamine.

Herbicides

- Inhibition de l'enzyme acétyl CoA carboxylase : séthoxydime.
- Inhibition de l'enzyme acétolactate synthase : halosulfuron-méthyle, metsulfuron-méthyle.
- Inhibition de l'enzyme photosynthèse au niveau du photosystème II : atrazine, métribuzine, prometon, prometryn, simazine, diruon, fenuron, linuron, siduron, bentazon.
- Inhibition de l'enzyme protoporphyrinogène oxydase : sulfentrazone.
- Inhibition de la mitose (inhibition de la formation des microtubules) : dithiopyr, pendiméthaline, prodiamine, propyzamide.
- Inhibition de la mitose (inhibition de la synthèse des acides gras à longue chaîne) : acétochlore, alachlore, métochlore, napropamide.
- Altération de la synthèse de l'auxine : MCPA.

Insecticides

- Action sur le système nerveux (inhibition réversible de l'acétylcholinestérase) : aminocarbe, bendiocarbe, carbaryl, carbofuran, méthiocarbe, méthomyl.
- Action sur le système nerveux (inhibition irréversible de l'acétylcholinestérase) : acéphate, azinphos-méthyl, chlorpyrifos, coumaphos, diazinon, dichlorvos, diméthoate, malathion, ométhoate, phorate, phosmet.
- Action sur le système nerveux (modulateur des canaux sodiques) : fluvalinate, resméthrine.
- Action sur le système nerveux (agoniste des récepteurs nicotiques de l'acétylcholine) : acétamipride, clothianidine, imidaclopride, thiaméthoxam, spinetoram.
- Inhibiteur d'enzyme mitochondriale (ATP synthétase) : propargite.
- Inhibiteur de la biosynthèse de la chitine (type 0) : diflubenzuron.
- Altération de la régulation de la croissance (agoniste des récepteurs de l'ecdysone) : méthoxyfénozide.
- Action sur le système nerveux (agoniste des récepteurs de l'octopamine) : amitraz.
- Altération du métabolisme énergétique (inhibition du transport des électrons dans les mitochondries) : fenpyroximate, pyridaben, roténone.

- Altération de la synthèse des lipides et régulation de la croissance (inhibition de l'acétyl CoA carboxylase) : spiriclofène.
- Lésions nerveuses et musculaires (modulateur des récepteurs de la ryanodine (calcium)) : chlorantraniliprole.
- Action synergique (inhibiteur de monooxygénase dépendant du cytochrome P450) : butoxyde de pipéronyle.

CLASSIFICATION TOXICOLOGIQUE

Les insecticides sont classés en fonction de leur toxicité estimée en mesurant la dose qui tue 50% des individus exposés par voie orale ou par contact. Les insecticides très toxiques ont une DL₅₀ (dose létale) inférieure à 50 mg/kg de poids corporel, tandis que les insecticides moins toxiques ont une DL supérieure à 5.000 mg/kg de poids corporel.¹⁹³ L'évaluation de la toxicité ne tient pas compte des effets synergiques, additifs, sublétaux et du fait que ces molécules peuvent s'accumuler dans le sol et la biosphère.

Sur de nombreux sites web, il est possible d'en savoir plus sur les propriétés physiques et chimiques des pesticides, sur les résultats des tests de toxicité aiguë et sur les effets sur certains organismes et sur l'homme.

- AGRITOX est une archive gratuite de données françaises sur les propriétés physiques et chimiques, la toxicité, l'écotoxicité, l'impact environnemental et la réglementation des produits phytopharmaceutiques. Une grande partie des informations provient de la documentation utilisée pour obtenir l'autorisation de mise sur le marché déposée par les industries françaises et européennes ; des informations bibliographiques sont également incluses.¹⁸⁹
- PPDB : Pesticide Properties DataBase est un référentiel d'informations sur les pesticides.¹⁹⁰
- ECOTOX Knowledgebase est une archive de l'Agence américaine de protection de l'environnement (EPA) sur la toxicité de nombreux produits chimiques.¹⁹¹
- EU Pesticides Database est la base de données européenne sur les pesticides.¹⁸⁶

Une des limites du système d'évaluation des risques est que l'évaluation toxicologique, qui sert à établir les concentrations maximales acceptables, varie fortement d'un pays à l'autre, de sorte que les limites de tolérance diffèrent par des ordres de grandeur (plus de 10 fois).²⁴³ Les réglementations sur l'utilisation des pesticides varient d'un pays à l'autre, entraînant des comportements hétérogènes tels que des interdictions et des limites très différentes. En Europe, une base de données sur les pesticides a été créée, qui répertorie diverses informations utiles telles que l'autorisation d'une molécule pour une culture spécifique et la législation de référence (base de données EU Pesticides).²¹⁴ La variabilité entre les réglementations nationales et parfois régionales constitue un obstacle au commerce de denrées alimentaires telles que les céréales, les fruits et les légumes. Par exemple, les États-Unis exportent des millions de kilos de pesticides qui sont interdits dans le pays ou classés comme très toxiques pour les abeilles.

Certaines statistiques montrent une baisse de la vente de pesticides, par exemple en Italie, entre 2001 et 2014, de 12%.⁵⁰⁴ Ce chiffre ne tient pas compte du fait qu'au fil du temps, l'utilisation de pesticides dont la toxicité est de dizaines de fois à plus de mille fois supérieure a augmenté, de sorte que le même effet est obtenu en utilisant de plus petites quantités, mais l'effet nocif équivalent a augmenté proportionnellement. C'est ce que confirment les données de surveillance sur la présence des molécules et des métabolites dans l'eau et la biosphère en général. En plus de 50 ans, le potentiel de destruction (toxicité) des armes chimiques à la

disposition des agriculteurs a également été multiplié par plus de 1.000, comme ce fut le cas pour les insecticides.

UNE EXPÉRIENCE ASCENDANTE AUTODESTRUCTRICE

Il existe probablement plus de 1.000 substances actives différentes sur le marché mondial, qui agissent par plus de 100 mécanismes différents connus et ont d'innombrables effets indésirables, dont beaucoup restent à découvrir.⁶⁰⁵ En 70 ans, les molécules utilisées ont été remplacées par des molécules plus toxiques.⁵⁰⁰ L'augmentation de la toxicité aiguë des différentes catégories de pesticides au fil du temps a eu pour effet de réduire les quantités pouvant être utilisées pour obtenir le même résultat par unité de surface. À titre d'exemple, aux États-Unis, l'insecticide DDT (organochloré) était utilisé en 1945 à une dose d'environ 2 kg/ha, tandis que 45 ans plus tard, les pyréthroïdes étaient utilisés à une dose de 0,1 kg/ha.⁵³⁸ Les molécules synthétiques telles que les pyréthroïdes, bien que ressemblant à des molécules naturelles, peuvent avoir une toxicité aiguë comparable à celle des néonicotinoïdes. Même en tenant compte des différences de niveaux de toxicité aiguë, qui dans le cas des pyréthroïdes sont au moins plusieurs centaines de fois supérieurs à ceux du DDT, l'utilisation des pyréthroïdes aux doses recommandées équivaut à l'utilisation de plusieurs dizaines de kilos de DDT. Il ne faut pas se laisser tromper par les statistiques montrant une réduction de l'utilisation des pesticides, car il faut tenir compte de leur toxicité équivalente et les comparer. Au fil du temps, les quantités distribuées ont diminué mais la toxicité équivalente rejetée dans l'environnement a été multipliée par dix.

L'une des stratégies proposées à plusieurs reprises au cours des décennies pour réduire les risques consistait à proposer de privilégier les molécules les moins dangereuses.⁵¹⁷ En fait, cette stratégie n'est restée qu'une proposition, puisque c'est exactement le contraire qui s'est produit, comme le montre le tableau ci-dessous.

Insecticides	Classe chimique	DL ₅₀ (ng/abeille)
DDT	Organo-chlorés	27.000
Amitraz	Produits azotés	12.000
Coumaphos	Organophosphore	3.000
Tau-fluvalinate	Pyréthroïdes	2.000
Méthiocarbe	Carbamates	230
Carbofuran	Carbamates	160
Lambda-cyhalotrin	Pyréthroïdes	38
Deltaméthrine	Pyréthroïdes	10
Thiametoxam	Néonicotinoïdes	5
Fipronil	Fenilpirazoili	4,2
Clothianidine	Néonicotinoïdes	4
Imidaclopride	Néonicotinoïdes	3,7

Remarques : ce sont tous des insecticides (le coumaphos et le tau-fluvalinate sont également des acaricides). DL₅₀ = dose létale capable de tuer 50% des abeilles exposées en quelques heures.

La toxicité des molécules, au fil du temps, a dû augmenter en raison de plusieurs facteurs intrinsèques aux monocultures : la simplification de l'écosystème agricole et la sélection indésirable de parasites résistants.

Au moins 2,4 milliards de kilos de pesticides sont distribués chaque année dans le monde (en 2006 et 2007).^{13, 280} Les États-Unis sont le plus grand producteur et vendeur au monde, utilisant 22% de la consommation totale, suivis par le Brésil.²⁸⁰

En 2003, plus de 219.000 tonnes de pesticides ont été utilisées en Europe, et en 2016, plus de 400.000 tonnes ont été vendues.^{13, 210, 212} En moyenne, entre 500 g et 1 kg de pesticides sont utilisés par an et par habitant en Europe. Parmi les 25 pays européens, l'Espagne (plus de 76.940 t), la France (plus de 72.000 t), l'Italie (plus de 60.000 t) et l'Allemagne (plus de 40.000 t) ont représenté 79% des ventes (la Turquie a vendu plus de 49.000 t la même année).²¹⁰

Les catégories de matières actives vendues en plus grandes quantités dans les quatre principaux pays utilisateurs européens (Espagne, France, Italie et Allemagne) étaient les suivantes : fongicides et bactéricides (38.905 t), herbicides (15.224 t), insecticides et acaricides (7.501 t). En Italie, les catégories de pesticides vendues en plus grande quantité, selon cette estimation, sont les fongicides et les bactéricides (37.000 t).²¹⁰ En Italie, en 2014, une moyenne de plus de 5 kg de matières actives a été utilisée par hectare, en Espagne plus de 3 kg/ha et en France et en Allemagne plus de 2,5 kg/ha.²¹³ En Italie, en 2015, au moins 140 millions de kilos de pesticides ont été vendus : 20 millions de kilos en Vénétie, plus de 19 millions de kilos en Émilie-Romagne, plus de 14 millions de kilos en Sicile ou dans les Pouilles respectivement, plus de 10 millions de kilos dans chacune des régions suivantes : Piémont, Lombardie et Campanie.⁵⁰⁰ Il s'agit certainement de sous-estimations (et donc d'optimisme) car elles sont basées sur des données auto-certifiées : malheureusement, les réseaux de surveillance actuels ne sont pas en mesure de faire un contrôle croisé. De plus, les quantités moyennes sont calculées sur l'ensemble de la surface agricole, alors que la répartition réelle n'est pas homogène. En supposant que les substances actives soient réparties uniformément sur les 12 millions d'hectares de terres agricoles de l'Italie, cela revient à distribuer en moyenne plus de 11 kg par hectare chaque année : cela confirme que l'Italie est l'un des plus gros consommateurs de pesticides d'Europe. Certaines cultures, comme les vignobles et les vergers de pommiers, peuvent avoir un nombre de traitements et des quantités beaucoup plus élevés : dans la province autonome de Trente, plus de 50 kg/ha par an, à Bolzano 43 kg/ha par an, dans le Val d'Aoste 22 kg/ha par an et en Vénétie 14 kg/ha par an.⁵⁰⁰ Dans les vergers de pommiers, on peut enregistrer des pics de 90 kg/ha par an.⁵³²

La répartition des pesticides n'est pas homogène, de sorte que les expositions peuvent varier considérablement. En France, une moyenne de 6,7 traitements est effectuée en colza, 6,6 en blé et 3,7 en maïs.²⁸⁰ En France, les vignobles occupent environ 10% de la surface agricole mais reçoivent 80% des fongicides et 46% des insecticides utilisés dans ce pays. C'est une autre raison pour laquelle il a été constaté que les viticulteurs français ont un risque deux fois plus élevé d'avoir une tumeur cérébrale et trois fois plus élevé d'avoir un gliome (les gliomes sont des tumeurs primaires qui prennent naissance dans le parenchyme cérébral ; les symptômes et le diagnostic sont similaires à ceux des autres tumeurs cérébrales).^{284, 285} Le risque de contracter la maladie de Parkinson ou d'Alzheimer est également plus élevé chez les viticulteurs : respectivement 5,6 et 2,4 fois.²⁹²

On estime qu'au moins 2 millions de tonnes de pesticides ont été utilisées dans le monde en 2019.⁷¹⁵ Les principaux pays utilisateurs de pesticides étaient (par ordre décroissant) : la Chine, les États-Unis et l'Argentine. Les catégories de pesticides les plus utilisées (par ordre décroissant) étaient : les herbicides (47,5%), les insecticides (29,5%) et les fongicides (17,5%). Malheureusement, les prévisions annoncent une possible augmentation.

Dans certaines régions de la planète, la capacité à réglementer et à contrôler le marché des pesticides est limitée, de sorte qu'ils sont vendus par des entreprises non enregistrées. Pour donner un exemple, en Afrique, 38% des pesticides vendus ont une étiquette incomplète et au moins 6% ne sont pas étiquetés.⁷¹⁵ Dans les pays en développement, où les informations sur les ventes et l'utilisation sont insuffisantes, au moins 20% de tous les pesticides sont vendus. Les quantités de pesticides utilisées, par hectare et par an, estimées dans certains pays du Monde (en 2014) sont présentées ci-dessous :⁷¹⁵

- Maurice (Afrique) : 27,2 kg/ha.
- Pays-Bas (Europe) : 9,9 kg/ha.
- Belgique (Europe) : 7,7 kg/ha.
- Portugal (Europe) : 6,84 kg/ha.
- Italie (Europe) : 6,5 kg/ha.
- France (Europe) : 3,9 kg/ha.
- Allemagne (Europe) : 3,8 kg/ha.
- Espagne (Europe) : 3,4 kg/ha.
- Congo (Afrique) : 3 kg/ha.

Les pesticides n'atteignent que très peu leurs cibles et la plupart d'entre eux se déplacent dans l'environnement : seulement entre 0,1% et 0,3% des molécules distribuées dans les champs atteignent l'organisme cible.^{280, 295} Par conséquent, la plupart des molécules migrent dans l'environnement, l'empoisonnant et générant de nombreux effets secondaires dévastateurs, y compris pour la santé humaine. Les molécules persistantes dans la biosphère circulent (par exemple dans la chaîne alimentaire), ce qui permet de multiplier les effets négatifs dans le temps. On peut dire qu'un processus systématique et constant d'empoisonnement général de l'ensemble de la biosphère est en cours.

Malgré l'utilisation généralisée de ces poisons, un grand pourcentage des cultures est perdu à cause des parasites. Par exemple, 37% des cultures aux États-Unis sont perdues à cause des mauvaises herbes, des insectes et d'autres parasites.⁷¹⁵ Entre 1945 et 2000, l'utilisation d'insecticides (organochlorés, organophosphorés et carbamates) aux États-Unis a été multipliée par 10 et les dégâts causés par les insectes ont doublé (de 7% ils ont atteint 13%). 35% de la production agricole mondiale est détruite par des parasites, dont 13% sont des insectes : de nombreux parasites deviennent résistants aux substances actives utilisées.²⁸⁰

Il est important de se rappeler que les effets létaux chez les organismes cibles, comme les insectes pour les insecticides, se produisent à des concentrations de l'ordre du millionième de gramme par insecte. Des effets néfastes sur la santé humaine peuvent également se produire à de très faibles doses, de l'ordre du millième de gramme ou moins. La distribution de quantités de centaines de grammes ou de kilogrammes par hectare dans le cas de certaines catégories de pesticides revient à contaminer la biosphère avec des bombes chimiques extrêmement puissantes et persistantes. L'utilisation massive de pesticides a engendré un certain nombre de problèmes, notamment :

- La génération de métabolites qui peuvent être aussi ou plus dangereux que les molécules d'origine comme les métabolites du DDT, l'amitraz ou l'ométhoate qui est un métabolite du diméthoate tout aussi toxique.^{181, 183} Les autres métabolites comprennent le sulfoxyde d'aldicarbe, le sulfate d'endosulfan, le sulfone de fipronil, le 5-hydroxy-imidacloprid, le DDE.^{45, 75} Le carbendazime, en plus d'être un fongicide, est également un métabolite du thiophanate-méthyle, un autre fongicide.³⁹
- La persistance des pesticides dans le sol : au Mexique, par exemple, l'insecticide organochloré DDT est détecté dans une fourchette de concentration comprise entre 0,057 ng/g et 360 ng/g.
- Le développement de mauvaises herbes résistantes aux herbicides. Par exemple, en Australie, entre 13 et 28% des mauvaises herbes (selon la zone géographique) ont connu l'apparition de plantes résistantes (par exemple, les plantes des genres *Avena*, *Bromus* et *Hordeum*).⁷¹⁵

- La découverte de plusieurs molécules toxiques dans l'eau potable à des concentrations de l'ordre du microgramme par litre (par exemple, 12 des 43 composés recherchés en Italie sont mesurés à une concentration totale de 0,5 µg/L).⁷¹⁵ En Italie, 224 pesticides ont été trouvés dans les eaux de surface et les eaux profondes en 2016 : les sites qui contenaient jusqu'à 36 molécules dans l'eau au même moment sont enregistrés.⁵⁰⁴ Dans l'eau potable de la Lombardie, l'herbicide le plus vendu au monde, le glyphosate, est présent à des concentrations allant jusqu'à 4 µg/litre.⁷¹⁶
- La difficulté de trouver en Europe (mais pas seulement là) des zones non contaminées par des herbicides et des insecticides. Pour donner quelques exemples, déjà en 2010, en Angleterre, au moins un tiers de la surface agricole était traitée avec des insecticides néonicotinoïdes. La même année, aux États-Unis, au moins 33 millions d'hectares de maïs, 31 millions d'hectares de soja et 21 millions d'hectares de blé ont été traités avec des insecticides néonicotinoïdes.
- Les pesticides se trouvent à l'intérieur des colonies d'abeilles d'élevage. Les parasites contre lesquels ils sont dirigés deviennent résistants. Des cas de *Varroa* résistant à l'amitraz, au fluvalinate et au coumaphos ont été enregistrés en Italie.^{35, 55}
- Contamination de la chaîne alimentaire. En Europe, au cours de la période 2012-2013, 33 ingrédients actifs différents ont été trouvés dans des produits végétaux utilisés pour la consommation humaine, à des concentrations de l'ordre de parties par million, comme le métalaxyl (0,16 - 0,4 mg/kg), le méthomyl (0,015 - 0,21 mg/kg) et l'imidaclopride (0,017 - 0,036 mg/kg). En Italie, au moins un tiers des denrées alimentaires contiennent des pesticides, souvent sous forme de multi-résidus (c'est-à-dire la présence d'au moins deux poisons en même temps).⁵⁰⁴

En Europe, la recherche de pesticides dans les aliments montre que 43,4% des 83.000 échantillons contiennent au moins une molécule.⁴⁴³ Dans les produits d'origine végétale, on trouve 154 substances différentes. En Italie, on trouve des pesticides dans plus de 60% des échantillons de fruits examinés, avec des multi-résidus fréquents : 5 dans les pommes, 8 dans les fraises, 15 dans les raisins.⁵⁰⁰ Dans un échantillon de thé, 21 résidus ont été trouvés en même temps. Parmi les substances les plus fréquemment retrouvées dans les fruits figurent l'imidaclopride, le diméthoate, le boscalide (suspecté d'être cancérigène et perturbateur endocrinien), le captane (possiblement cancérigène et perturbateur endocrinien, car il inhibe l'action des œstrogènes), le chlorpyrifos (probablement mutagène et perturbateur endocrinien), le phosmet, le métalaxyl et l'iprodione. Globalement, un cinquième des échantillons de fruits ou de légumes contiennent des substances potentiellement cancérigènes ou perturbatrices endocriniennes.⁵⁰⁰ Les céréales sont également contaminées : 17% contiennent des résidus dangereux tels que le chlormequata, qui est la substance la plus fréquemment trouvée (dans 50% des échantillons positifs). Cette molécule est suspectée d'être un cancérigène et un perturbateur endocrinien. Le carbosulfan, retiré depuis 2008 et non approuvé par l'Union européenne, a été trouvé dans 6,6% des échantillons d'huile d'olive. Le vin est également contaminé : 42% contiennent des pesticides et 22,4% ont plus d'un résidu. Parmi les substances recherchées dans le vin, les plus fréquemment trouvées sont : boscalid, captan, chlorpyrifos, phosmet, metalaxyl, iprodione, imidacloprid et diméthoate. Parmi les substances non autorisées mais retrouvées dans le vin lors de la surveillance nationale, on trouve le carbendazime et le bemomyl dans 4,2% des échantillons, et le fensulfothion dans 2,4% des échantillons (en 2014). Il convient toutefois de remarquer que le carbendazime est également un métabolite qui se forme

dans le sol à partir d'une substance autorisée : le thiophanate de méthyle. Sur 37 vins analysés (2017), 24 contiennent en moyenne 3 résidus et jusqu'à 8 substances sont retrouvées simultanément.⁵⁰⁰

Par conséquent, on retrouve des pesticides dans le cordon ombilical, le sang, l'urine et le lait maternel.

Comme nous l'avons déjà mentionné, les pesticides peuvent être très persistants et mobiles. Des pesticides distribués aux États-Unis dans les années 1990 ont été retrouvés des centaines de kilomètres plus au nord, en raison de la mobilité naturelle dans la biosphère et des décennies après leur dernière utilisation enregistrée : le chlorpyrifos (insecticide) a été retrouvé dans les glaciers arctiques.⁴⁴³ Certains insecticides organochlorés (DDT, HCH, heptachlore, toxaphène et lindane) peuvent rester dans le sol et les sédiments pendant des années, et peuvent être trouvés dans des zones éloignées comme les profondeurs des océans. Les organochlorés (par exemple HCH, DDT et lindane) sont toujours présents dans les rivières européennes, malgré leur interdiction depuis des décennies.⁴⁴³

L'utilisation des pesticides a toujours été défendue de manière agressive en les présentant comme une solution pour nourrir le monde. La dépendance à l'égard des pesticides a apporté des avantages à court terme, mais il est clair aujourd'hui que nous compromettons les droits à l'alimentation et à la santé des générations actuelles et surtout futures. Il faut également tenir compte du fait qu'une grande partie de la production agricole est utilisée pour nourrir les animaux d'élevage et qu'un tiers au moins devient un déchet. Aujourd'hui, il est de plus en plus évident que les problèmes de malnutrition et de sous-alimentation ne peuvent être résolus à l'aide de pesticides, mais en mettant en œuvre d'autres stratégies écologiquement durables qui réduisent les inégalités.

Les pesticides sont à l'origine d'un certain nombre de problèmes de santé, tant pour les travailleurs exposés professionnellement que pour la population générale. Parmi les principaux symptômes d'une exposition aiguë aux pesticides signalés par les agriculteurs figurent les irritations de la peau et des yeux, les maux de tête et les vertiges.⁴⁸⁷ L'exposition chronique aux pesticides favorise de nombreuses maladies différentes telles que la réduction des capacités cognitives, le diabète, les maladies neurodégénératives comme la maladie de Parkinson, la maladie d'Alzheimer et la sclérose latérale amyotrophique (SLA).^{296, 487} En outre, les pesticides peuvent favoriser le cancer et être des perturbateurs endocriniens.⁵⁰²

En conclusion, un principe clé à souligner est que les pesticides ne disparaissent pas mais se répandent, c'est-à-dire qu'ils envahissent la biosphère, persistent pendant des décennies et peuvent se bioaccumuler, atteignant des concentrations très dangereuses.

Nous devrions avoir une intelligence collective suffisante pour comprendre que les pesticides et l'agriculture intensive créent une dépendance aux produits chimiques parce qu'ils favorisent ou créent des parasites. Les pesticides tuent les organismes utiles qui sont les ennemis naturels des ravageurs des cultures. Au même temps, les parasites des cultures deviennent résistants aux pesticides. L'agriculture intensive détruit la biodiversité et favorise quelques espèces, souvent artificielles, exotiques ou très résistantes. Ainsi, un moteur diabolique, dévastateur et auto-entretenu a été généré par des règles stupides qui favorisent les intérêts économiques privés. Outre les ravages qu'ils causent aux organismes non ciblés, aucun segment de la population humaine n'échappe désormais aux très graves effets sur la santé. Nous utilisons des molécules conçues à l'origine pour des fins militaires, qui sont hautement toxiques et dont seule une petite fraction (moins de 1%) atteint les organismes cibles à la dose nécessaire pour générer une mort immédiate, comme le souhaitent les règles économiques épousées par la production agricole industrielle.

L'HERBICIDE LE PLUS VENDU AU MONDE : LE GLYPHOSATE

Le glyphosate est un herbicide systémique et ressemble à un acide aminé. Il est absorbé par les feuilles et transloqué partout dans la plante, y compris dans les racines. L'absorption a lieu en quelques heures, mais la dessiccation complète de la plante prend quelques jours.

Le glyphosate est l'herbicide le plus vendu dans le Monde (au moins 850.000 t en 2017) et c'est aussi la matière active la plus utilisée : aux USA, entre 1974 (année du début de la commercialisation) et 2014, une moyenne de 1 kg/ha par an a été distribuée ; dans la même période, dans le Monde, une moyenne de 0,53 kg/ha par an a été distribuée.⁷¹³ Aux Etats-Unis, 19% de la quantité distribuée dans le monde au cours des mêmes années ont été utilisés.^{714, 715}

Le glyphosate est probablement le poison le plus largement et systématiquement distribué sur la planète, en partie parce que les plantes génétiquement modifiées sont cultivées pour résister à sa phytotoxicité. Les plantes génétiquement modifiées favorisent la propagation de cette molécule toxique, exactement le contraire de ce que prétendaient les promoteurs de la biotechnologie.

Les plantes génétiquement modifiées tolérantes au glyphosate ont été introduites en 1996 et l'utilisation de cet herbicide s'est répandue par conséquence. Aujourd'hui, au moins 56% de l'herbicide glyphosate est distribué dans des cultures génétiquement modifiées tolérantes à cet herbicide : maïs, soja, coton et colza.⁷¹⁴ Avant la diffusion des PGM, ces cultures (maïs, soja et coton) recevaient moins de 10% de glyphosate. Dans certains pays, la plupart des cultures sont génétiquement modifiées : 100% du soja en Argentine, 93% au Brésil. L'Union européenne consomme 30 fois plus de soja qu'elle n'en produit, ce qui l'oblige à en importer la majeure partie.⁹⁸⁵ Déjà en 2015, environ 84% des 180 millions d'hectares plantés de cultures génétiquement modifiées étaient occupés par des plantes résistantes au glyphosate.¹¹⁶⁹

Le glyphosate est présent dans plus de 750 produits commerciaux différents et peut facilement être trouvé dans les aliments : dans 25% (27/109) des échantillons de pain analysés au Royaume-Uni ou dans 90% des échantillons de soja aux États-Unis.^{507, 552} En outre, il est important de remarquer que l'on estime que jusqu'à 44% du glyphosate distribué sur la planète n'est pas utilisé dans l'agriculture, mais par exemple pour éliminer les mauvaises herbes dans les zones urbaines, sur les voies ferrées et au bord des routes.

De nombreuses études montrent que la fertilité et la qualité des sols sont affectées négativement par les pesticides. Un rapport de la Commission européenne de 2017 révèle que 45% des sols européens analysés contiennent des résidus de glyphosate : sur 317 échantillons de sol (les 20 premiers cm), prélevés dans 10 pays européens, 21% contenaient du glyphosate, 42% contenaient l'un des métabolites les plus toxiques du glyphosate (AMPA ou acide aminométhylphosphonique) et 18% des échantillons contenaient les deux (à une concentration maximale de 2 mg/kg).^{268, 269, 275} Le sol a été prélevé sur les cultures suivantes : blé, orge, riz, maïs, triticale, avoine, pommes de terre, canne à sucre, tournesol, colza, agrumes, vignobles, oliveraies, tomates et autres.²⁷⁵ En Italie, 17% des échantillons de sol contiennent le métabolite AMPA, tandis qu'au Danemark, ce chiffre atteint 80%. Le glyphosate est contenu dans jusqu'à 53% des échantillons de sol au Portugal. Ces résultats montrent que le risque d'accumulation et de persistance dans l'environnement est largement sous-estimé. Le glyphosate peut rester dans le sol jusqu'à 387 jours et son métabolite (AMPA) pendant plus de 1000 jours, selon les conditions environnementales. La demi-vie de la concentration peut être inférieure à trois mois dans l'eau et à six mois dans le sol, mais génère des métabolites dangereux (par exemple, l'AMPA) qui sont plus persistants : au moins 240 jours dans l'eau.¹¹⁶⁵ Le glyphosate et le métabolite signalé sont tous deux toxiques pour les vers, les bactéries et les champignons et affaiblissent les plantes en les rendant plus sensibles aux maladies. Paradoxalement, la réduction de la fertilité des sols et leur pollution par les pesticides génèrent des plantes plus faibles et incitent donc les agriculteurs à utiliser davantage de pesticides. Cela crée un mécanisme d'autodestruction qui est amplifié.

Malheureusement, le glyphosate et le métabolite AMPA se retrouvent également dans l'eau. En Europe, le glyphosate a été trouvé dans 33% des 75.350 échantillons d'eau de surface (à des concentrations allant jusqu'à 370 µg/L) et le métabolite AMPA dans 54% des 57.112 échantillons d'eau de surface (à des concentrations allant jusqu'à 200 µg/L).²⁷⁰ Cet herbicide est si répandu qu'on le retrouve dans les eaux de pluie européennes : dans 10% des échantillons (à des concentrations allant jusqu'à 6,2 µg/L) et l'AMPA dans 13% des échantillons (à des concentrations allant jusqu'à 1,2 µg/L).²⁷⁵

En Italie, le glyphosate est présent dans les eaux de surface (20% des échantillons), les eaux souterraines, l'eau potable, les gazes en coton, les serviettes hygiéniques et dans de nombreux aliments tels que la farine, les pâtes (jusqu'à 0,16 mg/kg), le pain, l'avoine, la sauce soja, le miel et la bière.¹¹⁶⁵

Le glyphosate est également présent dans le miel : dans 45% de 11 échantillons de miel biologique (à des concentrations comprises entre 26 et 93 ppb) et dans 62% de 58 échantillons de miel conventionnel (à des concentrations comprises entre 17 et 163 ppb) provenant du monde entier. De façon alarmante, il a également été trouvé dans des miels de fleurs sauvages.¹¹⁶⁷

Il est important de remarquer que des concentrations significatives de glyphosate peuvent être enregistrées dans le nectar et le pollen : entre 2,8 et 31 mg/kg dans le nectar et entre 87 et 629 mg/kg dans le pollen (concentrations mesurées quelques jours après la distribution).¹¹⁶⁹ Le nectar de la ruche subit un processus de concentration (il perd de l'eau) et les concentrations auxquelles la colonie sera exposée peuvent donc être plus élevées. Par conséquent, des concentrations de glyphosate allant jusqu'à 1 mg/kg peuvent être enregistrées dans le miel.¹¹⁶⁹

Les effets sublétaux enregistrés chez les abeilles mellifères après une exposition au glyphosate comprennent une altération du rythme circadien, une altération de l'apprentissage olfactif et une réduction des capacités d'orientation (ces effets sont mesurés à de très faibles concentrations).⁸⁶ Comme on peut s'y attendre, dans les pays où les plantes génétiquement modifiées pour être résistantes à l'herbicide glyphosate ne sont pas cultivées ou ne sont pas largement utilisées, les plus faibles quantités de glyphosate sont trouvées dans les miels.

Plus de 173 pesticides différents (et/ou métabolites) peuvent être trouvés dans le miel et d'autres produits apicoles, de sorte que les effets synergiques et additifs, tant sur les insectes que sur les humains, sont en partie inconnus mais prévisiblement indésirables.¹¹⁶⁸ Les colonies exposées à ces molécules peuvent subir des dommages au niveau des capacités d'apprentissage des butineuses, de leurs capacités sensorielles et peuvent connaître un retard de développement.¹¹⁶⁹ Par exemple, la mémoire entre l'association d'un stimulus positif (odeur suivie de l'administration d'une solution sucrée) et le réflexe ultérieur d'extension de la trompe est réduite en présence de glyphosate. La capacité de la mémoire à court terme est ainsi altérée. De plus, les abeilles exposées à cette molécule ont besoin de plus de stimuli pour pouvoir les associer à la présence d'une récompense (le nectar). La capacité à discriminer la combinaison de différentes odeurs est également réduite. Dans l'ensemble, l'exposition au glyphosate entraîne l'altération d'aptitudes importantes pour la survie de la colonie et, à long terme, des effets dévastateurs tels que la réduction de la capacité d'orientation et l'altération d'une fonction importante des butineuses peuvent être enregistrés. Ces effets sont sublétaux, c'est-à-dire qu'ils peuvent altérer la capacité de survie de la colonie à faible dose et à long terme. Le glyphosate est considéré à tort comme peu préoccupant, alors qu'il devrait être classé comme une substance toxique pour les abeilles (et les autres).¹²²⁶

Cette molécule modifie également la composition de la flore intestinale. Un autre effet indirect grave de l'herbicide est de réduire la disponibilité florale pour les abeilles et autres insectes pollinisateurs, ce qui entraîne la malnutrition et la sous-alimentation.

Les pesticides peuvent avoir plusieurs effets négatifs, comme ceux des insecticides et des fongicides sur les oiseaux, les renards et les vers du sol. Les vers de terre du sol sont tués par des herbicides tels que le glyphosate ou voient leur capacité de reproduction altérée.^{280, 552} Le

glyphosate endommage également les mycorhizes, des micro-organismes qui vivent près des racines, les mollusques, les échinodermes, les reptiles (par exemple, il endommage l'ADN des caïmans), les amphibiens, les oiseaux (par exemple, il altère le système de reproduction des oiseaux) et d'autres animaux (par exemple, il altère le système de reproduction du canard colvert), des poissons, des mammifères (par exemple, il endommage le système circulatoire des porcs) et réduit l'activité photosynthétique de l'*Euglena* (une algue unicellulaire d'eau douce).⁵⁵²

Le glyphosate a été classé comme cancérigène probable par le Centre international du cancer en 2015. Le glyphosate est également soupçonné d'endommager certains micro-organismes (dans nos intestins et dans le sol), de favoriser l'autisme (en 1975, il était recensé chez un enfant sur 5000, en 1995 chez un enfant sur 500 et en 2017 chez un enfant sur 68), de favoriser la maladie cœliaque et d'autres maladies.^{1165, 1166}

L'une des conséquences involontaires de l'utilisation massive est la découverte de cette molécule dans le corps humain. Le glyphosate et ses métabolites (comme l'acide aminométhylphosphonique ou AMPA) peuvent être retrouvés dans les urines. Dans l'urine des personnes professionnellement exposées, des concentrations comprises entre 0,26 et 73,5 µg/L peuvent être mesurées, tandis que dans la population générale, y compris les femmes enceintes et les enfants, des concentrations comprises entre 0,16 et 7,6 µg/L peuvent être mesurées.⁷¹² Le glyphosate est également présent dans le cordon ombilical (entre 0,2 et 949 µg/L), dans le sang des femmes enceintes (dans le sérum entre 0,2 et 189 µg/L) et chez les enfants de familles non exposées professionnellement (dans l'urine entre 0,1 et 9,4 µg/L).⁷¹² Un aspect intéressant et inquiétant qui ressort de cette publication est que les concentrations les plus faibles que divers laboratoires sont en mesure de mesurer avec les méthodes analytiques disponibles varient entre 0,05 µg/L et 100 µg/L : rechercher le glyphosate à de très faibles concentrations d'un point de vue analytique n'est pas facile, également parce qu'il s'agit d'une molécule soluble, petite et ressemblant à de nombreuses autres molécules présentes dans la nature. Tous les laboratoires ne sont pas en mesure de détecter les concentrations attendues dans l'urine car les limites de détection sont trop élevées. Par conséquent, les concentrations de principes actifs, comme celles du glyphosate et de ses métabolites, sont si faibles qu'elles ne peuvent être détectées à l'aide des techniques d'analyse les plus courantes.

60% des personnes exposées professionnellement enregistrent du glyphosate dans leurs urines le jour du traitement et 27% trois jours plus tard. 4% des épouses des agriculteurs qui pulvérisent l'herbicide enregistrent du glyphosate dans leur urine le jour du traitement.⁷¹² Lors de la distribution dans les champs, l'air peut contenir jusqu'à 1,25 µg/m³ de glyphosate, que l'on retrouve également dans la poussière à l'intérieur des habitations. Une enquête réalisée aux États-Unis, à proximité de champs traités, montre des concentrations de glyphosate et d'AMPA allant de 0,97 à 9,1 ng/m³ dans 50% des échantillons d'air.^{268, 270}

La conséquence prévisible de l'utilisation généralisée du glyphosate est qu'on le retrouve partout : dans l'urine et dans le lait maternel. Dans la population non professionnellement exposée, le glyphosate peut être trouvé chez 65% des mères et 88% des enfants. De nombreuses études montrent que le glyphosate se trouve en plus forte concentration chez les enfants que chez leurs mères. Globalement, au fil du temps, entre 1993 - 1996 et 2014 - 2016, le pourcentage d'échantillons d'urine contenant du glyphosate est passé de 12 à 70%.⁷¹² La population non professionnellement exposée reçoit cet herbicide par l'eau (75 µg/L aux États-Unis) et les aliments (100 µg/kg dans les tomates) : aux États-Unis, 60% des échantillons de blé et de soja présentent des résidus de glyphosate.

Il est étonnant qu'une communauté sage et raisonnable, afin d'empêcher la propagation de quelques espèces qu'elle considère comme indésirables, utilise des moyens chimiques qui contaminent la biosphère, apportant la mort et la maladie même à elle-même. Les effets des pesticides dans la biosphère sont largement inconnus, nous jouons avec le sort de tous, bien qu'en vérité les effets généraux soient maintenant bien documentés. Il va sans dire que nous

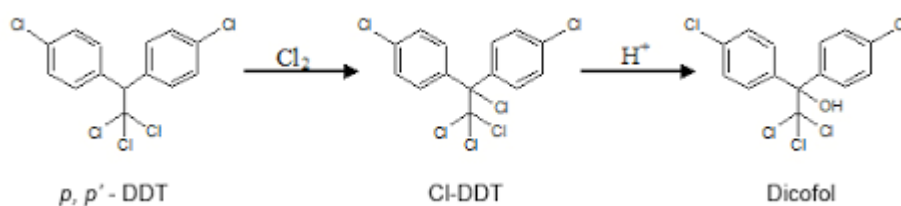
soumettons la biosphère à une expérience apocalyptique, dont les effets néfastes sont encore partiellement inconnus. Une société intelligente et prévoyante devrait épouser le principe de précaution et ne pas utiliser ces molécules.

DDT : L'INSECTICIDE QUI A PERMIS DE VAINCRE LE PALUDISME

Le para-dichlorodiphényltrichloroéthane (DDT) est un produit chimique synthétisé en 1874 mais commercialisé comme insecticide depuis les années 1940.^{181, 248} Le terme DDT (plus précisément *p,p'*-DDT (*1,1'*-(2,2,2-trichloroéthylidène)-bis[4-chlorobenzène]) est communément connu, mais il s'agit en fait d'un mélange complexe de ses isomères et de composés apparentés (par exemple, *o,p'*-DDT, *p,p'*-DDE et *p,p'*-DD). Ces deux derniers composés (ainsi que leurs analogues ortho et para dérivés du *o,p'*-DDT) sont également les deux principaux produits de dégradation dans les systèmes biologiques.

Le DDT, dont au moins 1,8 million de tonnes ont été distribuées dans l'environnement entre 1963 et 2010, voit sa concentration dans le sol divisée par deux entre 2 et plus de 15 ans. Son utilisation a connu un pic pendant la Seconde Guerre mondiale, car il était utilisé pour lutter contre les vecteurs de la malaria, de la typhoïde, du choléra, de la fièvre jaune et de la maladie du sommeil, et comme insecticide dans l'agriculture. Le DDT a été interdit dans de nombreux pays du monde depuis les années 1970 : en Italie en 1978. La réglementation sur l'utilisation du DDT est devenue extrêmement restrictive en 1981 et, en 1986, l'utilisation de ce composé était interdite dans l'UE. Bien qu'interdit dans la plupart des pays du monde, le DDT continue d'être utilisé pour lutter contre les moustiques vecteurs du paludisme, comme le recommande l'Organisation mondiale de la santé. Le paludisme continue d'affecter des millions de personnes : au moins 405.000 décès enregistrés en 2018, principalement des enfants.

Bien que le DDT ait été reconnu comme très dangereux pour l'environnement et les humains, il est toujours produit. De plus, il a été remplacé par des molécules chimiquement très similaires et plus toxiques. Une substance dangereuse a donc été remplacée par des substances plus puissantes ayant une structure chimique similaire. La synthèse du dicofol à partir du DDT est illustrée : il faut remarquer la similitude chimique, car le dicofol est produit à partir du DDT (le DDT peut donc constituer une petite fraction indésirable qui subsiste au cours du processus de synthèse du dicofol).^{183, 1282}



Comme pour les autres insectes, l'utilisation systématique et continue de molécules telles que le DDT (depuis 1950) ou le τ -fluvalinate a conduit à l'émergence de colonies d'abeilles résistantes.^{181, 183} Cette sensibilité réduite a été favorisée par des facteurs génétiques qui ont été récompensés par une sélection chimique artificielle par les agriculteurs et les apiculteurs.

Le DDT et ses composés sont présents dans le lait et les œufs, et s'accumulent dans les animaux domestiques et les poissons. En raison de ses propriétés lipophiles et de sa persistance dans l'environnement, le DDT et les composés apparentés sont sujets à la bioaccumulation et à

la bioamplification dans la chaîne alimentaire. La persistance et la bioaccumulation des pesticides dans l'environnement sont bien connues. Le DDT est rapidement absorbé par l'organisme des humains et des animaux, et certains métabolites liés au DDT sont généralement plus persistants que le DDT lui-même.

La découverte du DDT et de ses métabolites des décennies après l'interdiction est due à plusieurs facteurs tels que l'utilisation illégale et la persistance dans le sol pendant plus de 40 ans (DDT, DDE et DDD).⁵⁴¹ En réalité, elle est encore utilisée dans de nombreuses régions de la planète. Il est également utile de rappeler que ces molécules sont lipophiles et peuvent se bioaccumuler dans les tissus adipeux. Les concentrations moyennes de DDE chez les personnes de plus de 60 ans sont au moins trois fois plus élevées que chez les personnes âgées de 20 à 39 ans. Dans le corps humain, le DDT a une demi-vie de 6 ans et son métabolite, le DDE, de 10 ans.⁵⁴¹ En raison de leur remarquable persistance, ces insecticides peuvent facilement être retrouvés dans le sang et le lait maternel. Au Canada, le DDT ou ses métabolites ont été trouvés dans le sang des 1.696 sujets participant à la surveillance (âgés de 20 à 79 ans). La présence de DDT (trouvé chez 10% des sujets, avec une concentration moyenne de 10 ng/g) et de son métabolite le DDE (chez plus de 99% des sujets, avec une concentration moyenne de 326,9 ng/g) a été corrélée avec un dysfonctionnement pulmonaire (par exemple, une capacité respiratoire réduite), une bronchite et de l'asthme.⁵⁴¹ D'autres études ont également confirmé ce résultat.⁵⁴² En Espagne, on a constaté que le fait d'être exposé au DDT pendant l'enfance augmentait la probabilité d'enregistrer des problèmes respiratoires tels que l'asthme. Il convient de rappeler que le DDT est transformé en DDE [1,1-bis-(4-chlorophényl)-2,2-dichloroéthène] et en DDD [1,1-dichloro-2,2-bis(pchlorophényl)éthane] par la lumière (photolyse), les micro-organismes présents dans le sol et le métabolisme de l'homme. Dans ce dernier cas, la transformation est générée par l'action d'un complexe enzymatique appelé cytochrome P450. À leur tour, le DDE et le DDD sont transformés (par exemple par oxydation) en d'autres composés.

Les enquêtes révèlent la présence d'insecticides organochlorés dans tous ceux qui ont été testés, malgré le fait que seule une des 13 conformations chimiques possibles du DDT et du DDE (1 des 13 isomères possibles) a été recherchée.⁵⁴² Ainsi, la mobilité et la persistance dans la biosphère entraînent une contamination généralisée très préoccupante.

Les principaux organes cibles sont le système nerveux et le foie. Le DDT a également des effets négatifs sur l'homéostasie endocrinienne, la reproduction, le développement du fœtus et le système immunitaire. La DL₅₀, c'est-à-dire la quantité qui tue 50% des humains en cas d'ingestion, est de 10 mg/kg de poids corporel, ce qui signifie que 700-800 mg tuent un homme de 70-80 kg.²⁸⁰ Le CIRC (Centre international de recherche sur le cancer) a classé le DDT comme un agent cancérigène possible pour l'homme (groupe 2B). L'exposition au DDT est principalement déterminée par le dosage du DDE. Le dosage de l'autre métabolite important, le DDD, n'est jamais effectué car, comme on le sait depuis longtemps, il est excrété très facilement.

En conclusion, le DDT est connu pour être neurotoxique, cancérigène et pour causer des dommages au système immunitaire et à la reproduction. Bien que ces connaissances soient désormais publiques et validées, le DDT est probablement produit et utilisé dans au moins les pays suivants : Chine, Inde, Afrique du Sud, Éthiopie et Corée du Nord.⁵⁴¹

Le DDT est l'une des substances incluses dans la convention de Stockholm sur les *polluants organiques persistants (POP)* et le protocole sur les POP (LRTAP-POP) de la convention de la Commission économique des Nations unies pour l'Europe (CEE-ONU) sur la pollution atmosphérique transfrontalière à longue distance.

INSECTICIDES À BASE D'ORGANO-PHOSPHORATES ET DE CARBAMATES

Les insectes tels que les insectes pollinisateurs (abeilles et papillons) sont exterminés par l'arsenal de poisons qui constitue la base de l'agriculture industrielle. De 1985 à 1997, le nombre de colonies d'abeilles dans les zones rurales des États-Unis a diminué de 57%, principalement à cause des pesticides.¹⁷⁵ En agriculture, l'utilisation d'insecticides aux doses recommandées sur l'étiquette (par exemple le chlorpyrifos, le dichlorvos, le malathion, le profenofos, le monocrotophos qui sont tous des organophosphorés ; la deltaméthrine qui est un pyréthroïde et le thiaméthoxam qui est un néonicotinoïde) provoque la mort de 100% des abeilles domestiques (*Apis mellifera* et *Apis cerana*) exposées (par contact) en moins de 48 heures.⁸⁶⁶ D'autres insecticides (chlorhydrate de cartap, indoxacarbe et imidaclopride), aux doses recommandées, c'est-à-dire celles indiquées sur l'étiquette et dans les règlements approuvés par les autorités sanitaires, enregistrent un taux de mortalité compris entre 50 et 90%. Par conséquent, si ces molécules sont utilisées pendant la floraison ou à proximité des champs en fleurs, elles tuent les abeilles (et d'autres insectes) et il n'est pas étonnant qu'elles soient appelées insecticides.

Les pesticides agissent en altérant des mécanismes physiologiques fondamentaux et très importants. Par exemple, ils interfèrent avec les amines biologiques telles que les catécholamines, la dopamine, la sérotonine, l'histamine et l'acétylcholine, qui remplissent des fonctions nerveuses, endocrines et exocrines essentielles chez les insectes et ailleurs. Ils sont impliqués dans des comportements tels que l'agressivité, la recherche de nourriture, la contraction musculaire, les processus d'apprentissage et de mémoire. La perturbation des mécanismes de modulation de ces substances génère des effets désastreux, même à très faible dose. En outre, ils peuvent altérer les fonctions de centres importants tels que les mitochondries et produire des dommages génétiques.

Certains insecticides comme les organo-phosphorates et les carbamates agissent sur le système nerveux en inhibant l'activité de l'acétylcholinestérase, une enzyme permettant d'inactiver le neurotransmetteur acétylcholine, présent par exemple dans les synapses entre les neurones du système nerveux central des abeilles (la dose létale pour 50% des individus exposés ou DL₅₀ peut être comprise entre 0,018 et 31,2 µg/abeille).¹⁰⁷ Ces insecticides génèrent une accumulation de neurotransmetteurs et, ayant un mécanisme d'action similaire, peuvent produire des effets additifs et synergiques et sont également très toxiques pour l'homme.⁵¹⁶ Il convient de rappeler que les inhibiteurs de l'acétylcholinestérase ont été produits dans les années 1930 comme agents neurotoxiques pour être utilisés dans les guerres.

Pour certains de ces insecticides, les abeilles peuvent présenter une tolérance accrue en raison de la présence de mécanismes enzymatiques protecteurs (par exemple, le cytochrome P450). Les organophosphorés peuvent inhiber certaines enzymes (comme les estérases) même à de très faibles concentrations. Une étude menée au Royaume-Uni a montré que deux molécules étaient responsables de 49% (57/117) des intoxications d'abeilles entre 1994 et 2003 : un organophosphate (diméthoate) et un carbamate (bendiocarbe).¹⁰⁷ L'un des organophosphorés est le coumaphos, largement utilisé par les apiculteurs pour tuer un acarien parasite, le *Varroa*. Cette molécule s'est avérée dangereuse : il a été démontré que des concentrations de 8 mg/L dans l'alimentation augmentent la mortalité des larves.¹⁰⁷

PYRÉTROÏDES

Les pyréthroïdes sont produits par synthèse chimique et agissent comme insecticides et acaricides. Ce sont des analogues synthétiques des pyréthrines, constituants naturels des fleurs de plantes de la famille des Astéracées (*Chrysanthemum cinerariifolium*). Ils agissent de la même manière que les composés chimiques correspondants d'origine naturelle, mais surmontent

la principale limite des pyréthrinés : leur photolabilité. Il s'agit d'ingrédients actifs produits artificiellement qui sont beaucoup plus persistants que les analogues naturels. Le premier pyréthroïde synthétique, le fenvalérate, a été mis sur le marché en 1978.¹⁶²

Les pyréthrinés agissent principalement par contact et leur liposolubilité permet la pénétration dans les cires épicuticulaires. Le mécanisme d'action est basé sur l'interaction avec les canaux sodiques (ils provoquent une prolongation du flux de sodium pendant l'excitation).⁵¹⁶ Les pyréthrinés, malgré leur origine naturelle, sont toxiques pour les abeilles (DL₅₀ comprise entre 0,05 et 21 µg/abeille).¹⁰⁷ Les pyréthroïdes synthétiques, qui ont une structure similaire à celle des pyréthrinés, sont également très toxiques pour les abeilles (DL₅₀ comprise entre 0,017 et 20 µg/abeille).

Les pyréthrinés de contact sont répulsifs et irritants : les insectes contaminés par de faibles doses présentent un effet sublétal d'irritation. Certains pyréthroïdes sont utilisés comme acaricides par les apiculteurs (la fluméthrine et le τ-fluvalinate sont utilisés pour lutter contre le *Varroa*) et peuvent rester dans la cire même à des concentrations élevées (200 ppm).

LES INSECTICIDES PERTURBATEURS ENDOCRINIENS

Une autre catégorie d'insecticides modifie la croissance des insectes en inhibant la synthèse de la chitine de l'exosquelette ou la métamorphose. Ces molécules comprennent le diflubenzuron et le fenoxycarb. Ces molécules sont également très toxiques pour les abeilles, notamment pour les larves : le diflubenzuron a des effets négatifs même à des concentrations de 1 mg/kg.¹⁰⁷

Les insecticides importants sont ceux qui modifient les fonctions hormonales, comme le pyriproxifène, qui imite l'action de l'hormone juvénile. Cette molécule est active dans les processus de métamorphose, d'embryogenèse, de reproduction et de développement larvaire de nombreuses espèces d'insectes. Il s'agit d'une molécule analogue à la néoténine ou hormone juvénile.²¹⁷ Chez les insectes, cette hormone régule la mue des larves, et chez les insectes adultes, chez la reine et le mâle, elle est essentielle à la maturation gonadique et au comportement sexuel.³⁵ Chez les abeilles ouvrières, une augmentation de sa production accompagne la transition de l'abeille nourrice à l'abeille butineuse. L'hormone doit être produite en quantités précises à des moments spécifiques de la vie reproductive de l'insecte, sinon celui-ci meurt. L'administration de pyriproxifène favorise une série de déséquilibres physiologiques et hormonaux qui conduisent à la mort de l'insecte. Bien que cet insecticide soit classé comme modérément toxique, il est capable de générer des effets indésirables à de très faibles concentrations (ces effets sont considérés comme sublétaux mais tout aussi dangereux que les effets létaux).¹³ En Espagne, il est utilisé pour lutter contre les cochenilles des agrumes ; il est également utilisé dans les plantations de coton et de thé, pour lutter contre les puces des chats et des chiens, et pour contrôler les stades larvaires des moustiques. L'application de 0,25 kg/ha de la matière active pyriproxifène dans les agrumes génère un résidu dans le fruit de 0,41 mg/kg (mesuré dans la peau). Il a été démontré que cette molécule à de très faibles concentrations, qui correspondent à celles trouvées dans l'eau des zones agricoles où elle est utilisée, génère des effets sublétaux tels que des altérations du développement et du comportement. Des études utilisant des modèles informatiques prédictifs sur les effets (sublétaux) générés par de très faibles doses de pyriproxifène prévoient l'effondrement des colonies dans l'année qui suit l'exposition à des concentrations considérées comme acceptables et sûres ; ces prédictions n'ont malheureusement pas été validées sur le terrain et la classification doit donc être revue.¹³ Les procédures appliquées pour examiner et classer la toxicité des pesticides en vue d'obtenir une autorisation de mise sur le marché ne fournissent pas les garanties nécessaires.

L'UTILISATION D'INSECTICIDES VÉGÉTAUX : LES NÉONICOTINOÏDES

Les insecticides néonicotinoïdes sont dérivés de la nicotine, une molécule produite par les plantes du genre *Nicotiana*. Les feuilles de la plante de tabac (*Nicotiana tabacum*) peuvent contenir 90.000 ppm de nicotine, le pollen 23 ppm et le nectar 0,1-5 ppm.¹⁰⁷ La nicotine imite le neurotransmetteur acétylcholine en stimulant les neurones post-synaptiques.⁶⁰⁸ Les néonicotinoïdes sont des analogues synthétiques de la nicotine qui ont une affinité beaucoup plus grande pour les récepteurs d'acétylcholine du cerveau des abeilles. Ils sont utilisés depuis les années 1990 et sont aujourd'hui les insecticides les plus utilisés dans le monde : dans au moins 120 pays et sur 140 cultures (le thiaméthoxame sur 115 cultures).^{337, 525, 553}

Moins de 10 molécules appartenant à cette catégorie sont largement commercialisées, mais elles représentent plus de 40% du marché mondial des insecticides agricoles : thiaméthoxame, clothianidine, imidaclopride, acétamipride, thiaclopride, sulfoxaflor, dinotéfurane, nitenpyram.^{230, 355} Les néonicotinoïdes (et le fipronil) représentent un tiers du marché mondial des insecticides : au moins 20.000 tonnes de substances actives ont été produites en 2010.³⁵⁵ En 2008, l'herbicide glyphosate était l'ingrédient actif le plus vendu dans le monde, suivi de l'imidachlorprid (au moins 5.450 tonnes ont été vendues) : l'imidaclopride était l'insecticide le plus utilisé dans le monde en 2009.⁵⁸⁵ Ces insecticides sont également homologués pour un usage domestique, par exemple comme pesticides sur les chiens ou les chats.

Depuis les années 2000, ils sont utilisés dans les semences et, par conséquent, leur utilisation s'est accrue. Les néonicotinoïdes pénètrent dans les tissus végétaux (ils sont systémiques) et persistent longtemps. De très faibles concentrations de certains ingrédients actifs à l'intérieur de la graine suffisent à garantir que, pendant toute la durée de vie de la plante, tout insecte tentant de manger ses tissus sera tué. Ils sont enrobés dans les graines et resteront actifs dans la plante tout au long de sa croissance jusqu'à la récolte. Ils sont donc toxiques à très faible dose et sont persistants. Il s'agit d'une nouvelle génération de plantes toxiques ou insecticides créées par l'ingéniosité humaine. La stratégie consiste à les utiliser de manière préventive, avant même de savoir si des insectes phytophages seront présents, et sans déterminer les seuils économiques d'intervention phytosanitaire. C'est comme si l'on demandait aux humains de commencer à prendre des antibiotiques dès la naissance et tout au long de leur vie dans l'espoir de prévenir de probables maladies futures. Les néonicotinoïdes dans les semences, pour augmenter les effets exterminateurs souhaités par les agriculteurs, sont utilisés en combinaison avec d'autres molécules comme le fipronil. C'est un stratagème insensé, qui a malheureusement déjà été mis en œuvre depuis des années sur des millions d'hectares.

En 2010, la plupart des néonicotinoïdes ont été utilisés pour traiter des semences telles que celles du blé, de la betterave, du soja, du riz, de l'orge, du maïs, du tournesol, du colza et du coton.^{359, 553} Aux États-Unis, déjà entre 2009 et 2011, plus de 18 millions d'hectares (presque deux fois la surface agricole utilisée en Italie) ont été cultivés avec des semences de maïs imprégnées de néonicotinoïdes : au moins 810 t de clothianidine et 570 t de thiaméthoxam ont été distribuées dans l'environnement chaque année (le maïs a été alterné avec du soja).^{414, 451} En 2010, aux États-Unis, les cultures suivantes ont été traitées avec des néonicotinoïdes (imidaclopride, clothianidine ou thiaméthoxame) 100% de la superficie plantée en colza, 94% de la superficie plantée en maïs, 75% de la superficie plantée en sorgho, 65% de la superficie plantée en canne à sucre, 51% de la superficie plantée en riz, 42% de la superficie plantée en blé, et un pourcentage équivalent pour les cultures de coton (les autres cultures où les néonicotinoïdes sont utilisés sont les pommes de terre, les arachides et la luzerne).⁶⁷⁸ Nous parlons de plus de 95 millions d'hectares qui enregistraient déjà il y a 20 ans une utilisation massive et injustifiée de molécules très toxiques rien qu'aux USA (à titre de comparaison, la

surface agricole utile européenne est d'environ 171 millions d'hectares en 2016). Une autre estimation rapporte qu'aux USA, en 2011, entre 34% et 44% du soja et entre 79% et 100% du maïs ont utilisé des semences traitées avec ces molécules (hors 0,2% de maïs bio).³⁴⁹ En 2015, aux États-Unis, les néonicotinoïdes ont été enregistrés pour 500 applications différentes.³⁴⁹ La quasi-totalité des semences de maïs plantées en Amérique du Nord sont probablement traitées avec des néonicotinoïdes et au moins 90% des semences de blé cultivées aux États-Unis.⁴⁸²

Au Canada, les néonicotinoïdes sont utilisés dans 44% de la surface agricole (215.000 kg par an) et 95% du colza est traité avec ces insecticides systémiques (sur 8,5 millions d'hectares).⁴¹⁵ En Inde aussi, une grande partie des semences sont enrobées d'insecticides.¹⁷⁵

Les néonicotinoïdes ont été introduits pour la première fois en Europe et au Japon en 1990 (imidaclopride).¹⁹³ En France, l'imidaclopride a été introduit dans la culture du navet en 1991, dans les plantations de maïs l'année suivante et dans les tournesols en 1993.³⁰⁷ L'utilisation de néonicotinoïdes dans le traitement des graines, comme celles de tournesol en France, a été soupçonnée d'être l'une des causes du déclin des abeilles.³⁶³ L'imidaclopride a été autorisé dans les graines de tournesol en France en 1993 et a été interdit en 1999, notamment en raison des protestations des apiculteurs, qui ont signalé des pertes de 40 à 70%, contre 10% dans les années précédant 1994.⁵⁵³ Cinq ans plus tard, il a également été interdit dans les semences de maïs.⁴⁸²

En Angleterre et au Pays de Galles, 11 années de surveillance ont montré une corrélation entre la mortalité des abeilles et l'utilisation de l'imidaclopride.⁴⁸³

Les insecticides néonicotinoïdes, qui sont utilisés en Italie dans des semences telles que le maïs, ont montré une augmentation de la mortalité des abeilles en 2003.¹⁶³ En 2008, en Italie, suite à la forte mortalité enregistrée au printemps, en même temps que les semis de maïs, il a été décidé d'interdire l'utilisation de certains dans les semences : l'imidaclopride, le thiaméthoxame, la clothianidine et le fipronil (qui n'est pas un néonicotinoïde).³⁵ Cette interdiction a eu pour effet positif de réduire la mortalité des abeilles les années suivantes : 12,5% en 2012 et 11,6% en 2013.¹⁶³ En Allemagne, la mortalité accrue des abeilles a également été associée à la pratique consistant à semer des graines de maïs contenant des néonicotinoïdes (clothianidine).⁴⁷⁵

L'application continue, préventive et systématique de pesticides dans les semences génère une contamination sans précédent de la biosphère. Aux États-Unis, des dizaines de millions d'hectares de maïs ont été cultivés avec des plantes contenant du thiaméthoxam ou de la clothianidine (cette dernière, dans l'organisme de l'insecte, s'avère être un métabolite du premier) à des doses comprises entre 0,25 et 1,25 mg par graine. En 2010, au moins 50 millions d'hectares étaient déjà cultivés avec des semences de maïs, de coton ou de colza traitées avec des pesticides tels que les néonicotinoïdes. Rappelons que la dose qui tue 50% des abeilles exposées par contact se situe entre 22 et 44 milliardièmes de gramme (ng) par insecte. La dose qui tue les insectes par ingestion est 10 fois plus faible que par contact : la DL₅₀ de la clothianidine se situe entre 2,8 et 3,7 milliardièmes de gramme par abeille.³⁶⁸ La quantité capable d'exterminer les insectes est un ordre de grandeur un million de fois inférieur à la quantité présente dans chacune des plus de 12.000 graines plantées dans un hectare. En supposant qu'une graine de maïs contienne 0,5 mg de clothianidine, il s'ensuit que chaque grain contient la dose potentiellement suffisante pour tuer des dizaines de milliers d'abeilles. À travers les graines, chaque hectare est contaminé par une quantité de clothianidine ayant la capacité potentielle d'exterminer des millions d'abeilles, celles qui vivent dans des dizaines de milliers de ruches pendant l'été. Ces calculs théoriques nous aident à obtenir une mesure du pouvoir destructeur déployé et ne tiennent pas compte du fait que certaines molécules sont très persistantes, de sorte que les effets nocifs peuvent durer très longtemps.

Ces molécules tuent les insectes à des concentrations de millièmes de gramme et provoquent des effets sublétaux à des concentrations de milliardièmes de gramme. Chez les insectes sociaux comme les abeilles, les pesticides altèrent la capacité à communiquer :

l'insecticide imidaclopride réduit la possibilité de communiquer par la danse.⁵⁸⁹ À très faible dose, cet insecticide a un effet excitateur, mais à plus forte dose, il a un effet inhibiteur. Les effets enregistrés à des doses inférieures à la dose létale comprennent une altération de la capacité des abeilles butineuses à s'orienter, l'exécution de vols beaucoup plus longs et plus longs, et une réduction des possibilités de communication. Leur mémoire est également altérée et ils sont incapables de retourner à la ruche. En fait, la viabilité de la colonie est sérieusement compromise au point de s'effondrer.

Les abeilles peuvent être contaminées lors des semis par la poussière produite. Au printemps 2008, 11.000 colonies d'abeilles en Allemagne ont été gravement endommagées par les néonicotinoïdes présents dans la poussière lors des semis de maïs.⁴⁸⁴ Il faut rappeler qu'à cette époque, en Allemagne, il était même obligatoire de traiter le maïs avec le néonicotinoïde clothianidine pour lutter contre une chrysomèle des racines (*Diabrotica virgifera*). La clothianidine a ensuite été retirée d'Allemagne, mais l'utilisation obligatoire des néonicotinoïdes dans les semences de maïs contre les chenilles des racines a également été réglementée dans d'autres États (par exemple, en Autriche). Tous les échantillons de sol dans lesquels du maïs a été planté enregistrent la présence des néonicotinoïdes (par exemple, la clothianidine) et des herbicides (par exemple, l'atrazine) utilisés dans le champ.³⁶⁸

Les pesticides sont distribués partout et à grande échelle via les semences, sans avoir la certitude d'en avoir besoin. Les seuils économiques d'intervention ne sont pas évalués, et la souscription d'une police d'assurance pour tout dommage économique inacceptable causé par les insectes serait probablement une stratégie alternative meilleure et moins coûteuse. L'un des principes à appliquer avant de décider de la distribution de poisons est d'évaluer le rapport entre les avantages et les inconvénients, également d'un point de vue économique. Les parasites des cultures ne deviennent dangereux que lorsqu'ils dépassent certains seuils que les agronomes doivent déterminer au cas par cas. Avec cette stratégie, il y a un empoisonnement systématique de l'environnement, donc il y a certainement toutes les conséquences négatives comme la pollution, la destruction de la biodiversité, les maladies pour les abeilles et les humains, et la facilitation de l'émergence de parasites résistants. Les insecticides tuent également les antagonistes naturels des ravageurs, de sorte que ceux qui deviennent tolérants à la molécule auront également moins de concurrents.

LES NÉONICOTINOÏDES DANS LES FLEURS

Les néonicotinoïdes peuvent contaminer le sol, où ils peuvent rester jusqu'à 19 ans (il s'agit probablement d'une sous-estimation car les informations à ce sujet sont insuffisantes).¹⁶⁶ Des résidus de néonicotinoïdes ont été trouvés dans des plantes ligneuses six ans après le dernier traitement du sol.³⁶² À cet égard, il faut savoir qu'environ 70% des espèces d'abeilles construisent leurs nids dans le sol.

Les néonicotinoïdes peuvent également se retrouver dans les organes reproducteurs des plantes. Dans les parties reproductrices des plantes de riz et de pommes de terre, on trouve entre 0,7 et 12% de néonicotinoïdes, qui se distribuent d'abord dans le sol.³⁵⁹ La translocation se fait ensuite du sol vers les fleurs et les fruits. Dans les fleurs de tournesol, on peut trouver 0,2% de la quantité de Fipronil utilisée en combinaison avec des néonicotinoïdes (dans les graines ou dans le champ).³⁵⁹

L'imidaclopride est transloqué dans la partie comestible et il y a donc un risque pour la santé humaine. On trouve des néonicotinoïdes dans 46,7% des échantillons de fruits, à la suite de traitements foliaires, par exemple dans les melons, les tomates, les concombres et les courgettes, ou dans 10% des échantillons de laitue, d'épinards et de persil. Dans les tomates et les pommes, on trouve respectivement 21% et 28% de l'imidaclopride distribué sur les feuilles (au moins un

tiers de cette quantité se trouve sur la surface extérieure).³⁵⁹ Il est donc possible de trouver dans les fruits des concentrations d'imidaclopride supérieures aux limites maximales autorisées.

Ces molécules seront également présentes dans le pollen, le nectar et le miel. En Autriche, le thiaclopride se retrouve dans le miel à des concentrations comprises entre 11,1 et 81,2 ng/g. L'imidaclopride se retrouve dans le nectar et le pollen : l'application de 0,79 mg d'imidaclopride par graine de tournesol se traduit par 1,9 µg/kg dans le nectar et 3,9 µg/kg dans le pollen.³⁵⁶ La quantité moyenne d'imidaclopride dans le sol du tournesol de 6 µg/kg est associée à des concentrations dans les fleurs allant jusqu'à 2 µg/kg. Dans les graines de tournesol, l'imidaclopride peut être distribué à raison de 0,7 mg par graine et se retrouve dans les fleurs à des concentrations comprises entre 1 et 10 µg/kg : c'est la concentration à laquelle les abeilles peuvent être exposées (d'autres recherches le retrouvent à des concentrations comprises entre 5 et 30 µg/kg, en utilisant du carbone marqué).³⁶³ Les colzas dont les graines ont été traitées avec des néonicotinoïdes présentent des concentrations allant jusqu'à 3,5 mg/kg de thiametoxam dans le nectar et jusqu'à 2,4 mg/kg dans le pollen.⁴⁷⁵

Dans 83% des 24 échantillons de pollen, provenant de graines de tournesol traitées, l'imidaclopride a été enregistré à une concentration allant jusqu'à 11 µg/kg (dans un travail cité dans cette étude, le nectar est contaminé par 1,9 µg/kg d'imidaclopride).³⁶³ Dans le pollen de maïs, on trouve de l'imidaclopride à une concentration moyenne de 3 µg/kg et des concentrations de néonicotinoïdes de 20 ng/g (ppb). En supposant qu'une abeille puisse consommer 65 mg de pollen en 10 jours, cela signifie qu'elle ingère 1,3 ng (65 mg x 20 ng/g), soit près de 50% de la DL₅₀ qui est d'environ 2,8 ng/abeille. Dans cette étude, la plupart du pollen collecté par les abeilles était du pollen de maïs. Il faut tenir compte du fait que la DL₅₀ est estimée avec une seule exposition, alors que dans ce cas l'ingestion a lieu sur une période de dix jours, c'est-à-dire une exposition chronique ; d'autres pesticides sont également trouvés dans le pollen de maïs à la même époque, comme des fongicides (trifloxystrobine, azoxystrobine et propiconazole), des herbicides (atrazine et métolachlore) et des acaricides (coumaphos).³⁶⁸ Les effets additifs et synergiques peuvent renforcer considérablement les effets indésirables, augmentant ainsi la toxicité globale. Les néonicotinoïdes (clothianidine) et tous les pesticides énumérés ci-dessus (sauf le coumaphos) se retrouvent dans les fleurs sauvages (*Taraxacum officinale*) cultivées dans les champs voisins.³⁶⁸ Les abeilles sont exposées à un mélange toxique qui s'accumule dans le sol, se déplace dans la biosphère en contaminant les plantes sauvages voisines et persiste les années suivantes. Parmi les conclusions déconcertantes rapportées dans ce travail figure l'absence de semences de maïs non traitées aux néonicotinoïdes dans le réseau commercial.

Le tableau suivant montre les concentrations de certaines molécules enregistrées dans le pollen ou dans les matrices dérivées produites par les abeilles (mélange de pollen et de nectar).
359

Insecticide (dans le mélange de pollen et de nectar)	Pourcentage d'échantillons positifs (%)	Concentration moyenne (µg/kg)	Concentration maximale (µg/kg)
Acétamipride	24,1	3	134
	45	4,1	26,1
Clothianidine	11	9,4	41,2
Dinotefuran	1	45,3	168,1
	100	11,2	147
Imidaclopride	87,2	2,1	18
	16,2	19,7	912
Thiaclopride	62	89,1	1.002
Thiamethoxam	12,8	28,9	127
Fipronil	3	1,6	29

La pollution chimique des fleurs compromet fondamentalement la reproduction des plantes, générant des effets largement inconnus mais prévisiblement négatifs. Les concentrations sont si faibles que certaines méthodes d'analyse utilisées ne peuvent les détecter (la HPLC/UV ne mesure pas en dessous de 20 µg/kg).³⁶³ Un autre aspect alarmant est qu'il y a une augmentation (dans le temps) de la concentration d'imidaclopride dans les fleurs pendant leur formation.

Le tableau suivant indique les concentrations de certaines molécules présentes dans le nectar ou le miel.³⁵⁹

Insecticide (dans le nectar ou le miel)	Pourcentage d'échantillons positifs (%)	Concentration moyenne (µg/kg)	Concentration maximale (µg/kg)
Acétamipride	51	2,4	112,8
Clothianidine	17	1,9	10,1
	100	89	319
Dinotefuran	100	9,2	10,8
Imidaclopride	21,8	--	660
Thiaclopride	64	6,5	208,8
Thiamethoxam	65	11	20
Fipronil	6,5	70	100

Les tableaux ci-dessus montrent que le pollen, par rapport au nectar, est plus contaminé par les néonicotinoïdes, tandis que l'inverse est vrai pour le fipronil, bien que ce dernier soit moins soluble dans l'eau. Les concentrations sont obtenues à partir de situations très différentes puisque, par exemple, dans certains cas, les néonicotinoïdes ont été distribués dans le sol, dans d'autres avec les graines ou avec des pulvérisateurs sur les feuilles. Ces différences expliquent en partie la variabilité constatée. La distribution du mélange de matières actives, à l'aide de brumisateurs qui pulvérisent sur la partie aérienne, est une source de contamination plus importante que les autres. Ces recherches nous permettent de conclure que le pollen, le nectar et le miel sont des sources d'exposition aux pesticides, pour les abeilles comme pour les autres insectes. Les abeilles seront exposées de manière chronique à des concentrations pertinentes de ces molécules tout au long de leur vie (par exemple, par le biais du miel et du pollen stockés

dans la ruche). Les concentrations sont jusqu'à des centaines de fois supérieures à celles qui présentent des effets sublétaux (par exemple, l'imidaclopride).³⁶³ La situation est aggravée par la découverte simultanée de plusieurs principes actifs, par exemple dans le nectar (par exemple, 4 pesticides sur les 22 recherchés).³⁵⁹

Les néonicotinoïdes sont toxiques pour les insectes utiles tels que les abeilles solitaires élevées pour la pollinisation, comme *Osmia lignaria*, *Osmia bicornis* (les osmias sont des abeilles solitaires répandues en Europe), *Megachile rotundata* (abeille solitaire pollinisant la luzerne, les légumineuses et les carottes) et *Nomia melanderi* (abeille solitaire élevée aux États-Unis et en Nouvelle-Zélande pour polliniser la luzerne).^{362, 364, 365, 854} Les néonicotinoïdes tels que l'imidaclopride, la clothianidine, le dinitofurane et le thiametoxam sont également très toxiques pour les bourdons.³⁶²

Au moins cinq insecticides néonicotinoïdes sont utilisés en Europe et font partie des pesticides les plus utilisés dans le monde. C'est pourquoi on les trouve dans les sols occupés par des cultures biologiques et dans les sols où ils n'ont jamais été utilisés. Il existe une incertitude quant à leur persistance dans l'environnement et certaines données mesurent des demi-vies très différentes, pour l'imidaclopride entre 28 et 1.250 jours.¹²²³ En raison de leur utilisation répandue et de leur persistance, les néonicotinoïdes peuvent se retrouver dans le miel et d'autres aliments. En Europe, les limites maximales autorisées dans les aliments sont de 0,05 mg/kg pour la clothianidine et l'imidaclopride et de 0,2 mg/kg pour le thiaclopride.

En Irlande, la clothianidine, l'imidaclopride et le thiaclopride ont été recherchés dans 30 échantillons de miel, collectés en 2014, provenant de 30 ruchers situés dans trois types de zones : urbaines, semi-naturelles et agricoles. Soixante-dix pour cent des 30 échantillons de miel contenaient au moins un des trois insecticides et 48% en ont enregistré deux. Les néonicotinoïdes sont également moins fréquemment trouvés dans les échantillons de miel provenant de colonies situées dans des zones classées comme semi-naturelles. Les deux échantillons contenant les trois néonicotinoïdes proviennent de zones urbaines ou agricoles. Le miel produit dans les milieux urbains irlandais présente le plus grand nombre d'échantillons positifs et la clothianidine est la plus fréquemment trouvée. Cette information confirme que les néonicotinoïdes sont également utilisés dans les villes (installations sportives, jardins publics, plantes ornementales). Au Royaume-Uni, 70% des plantes ornementales commercialisées peuvent contenir des traces de néonicotinoïdes, qui sont capables de nuire aux abeilles à des doses de quelques milliardièmes de gramme par insecte, de sorte que même à de faibles concentrations, ils sont dangereux.¹²²³

Des molécules toxiques sont répertoriées dans les aliments les plus importants pour les insectes pollinisateurs et en quantités plus que suffisantes pour induire des effets sublétaux chez les abeilles, sans tenir compte des effets des métabolites et de l'exposition concomitante à d'autres pesticides. Les espèces non ciblées sont exposées à des molécules toxiques qui sont bioaccumulatives, hydrosolubles et persistantes (produisent des métabolites nocifs), même les années suivantes. Les néonicotinoïdes vont contaminer l'eau, générant une contamination très dangereuse loin des lieux où ils sont distribués.

LES NÉONICOTINOÏDES DANS LES GOUTTES DE GUTTATION ET LA RÉSINE VÉGÉTALE

Les abeilles prennent la résine des plantes pour produire la propolis. Les chercheurs ont découvert que la résine de plantes de tournesol, dont les graines avaient été traitées avec des néonicotinoïdes, pouvait être à l'origine de la présence des mêmes molécules dans la propolis : l'imidaclopride a été déterminé à une concentration comprise entre 20 et 100 ng/g.³⁵⁹

Outre le nectar et le pollen, les néonicotinoïdes peuvent également se trouver dans des gouttelettes de liquide sécrétées par les plantes par transpiration (ou guttation), qui sont aspirées par des insectes tels que les abeilles. La guttation est un phénomène naturel au cours duquel les plantes sécrètent des gouttelettes d'eau contenant des substances organiques et inorganiques. Elles peuvent être sécrétés par différents tissus tels que les feuilles et sont utilisés par les abeilles et d'autres insectes. Grâce à ce mécanisme, les plantes éliminent les substances et régulent la turgescence. Les néonicotinoïdes distribués avec l'eau d'irrigation se retrouvent également dans les gouttelettes de guttation. Les insecticides peuvent être mesurés dans les liquides de guttation à des concentrations de centaines de parties par million.³⁵⁹ Les plants de maïs produisent ces gouttelettes principalement dans les premières semaines après le semis : entre 0,1 et 0,3 mL par plante et par jour.³⁵⁹ Les gouttes de guttation peuvent contenir des concentrations d'insecticides des milliers de fois supérieures à celles susceptibles d'avoir des effets néfastes sur les abeilles.²⁶⁰ Des recherches menées en Italie ont révélé la présence de néonicotinoïdes dans les gouttes de guttation produites par le maïs (dont les graines avaient été traitées) au cours des deux premières semaines suivant le semis, à des concentrations comprises entre 10 et 100 mg/L pour le thiaméthoxame et la clothianidine, et jusqu'à 200 mg/L pour l'imidaclopride.⁴⁰⁰ Les abeilles prenant des gouttes de guttation avec ces concentrations sont mortes en quelques minutes.

DES SUBSTANCES TOXIQUES À TRÈS FAIBLE CONCENTRATION

La dose létale par ingestion d'imidaclopride, qui peut tuer 50% des abeilles exposées, varie entre 3,7 et 102 milliardièmes de gramme par abeille, selon le modèle expérimental appliqué.³⁶³ Deux aspects doivent être soulignés :

- Des milliardièmes de gramme suffisent à tuer un insecte en quelques heures ;
- Des études différentes peuvent aboutir à des résultats très différents en matière d'évaluation toxicologique, même d'un ordre de grandeur.

Un milliardième de gramme par abeille équivaut à une concentration dans l'aliment (pollen, nectar ou miel) comprise entre 0,1 et 1,6 mg/kg.³⁶³ Alors que la dose qui tue 50% des abeilles exposées par contact est d'environ 24 ng par abeille (enquête expérimentale pouvant durer jusqu'à 48 heures).³⁶³ La toxicité des néonicotinoïdes pris par voie orale est supérieure à celle de contact. Certains composés (néonicotinoïdes nitroguanidines dont l'imidaclopride, la clothianidine, le thiaméthoxam et le dinotéfurane) sont très toxiques pour les abeilles : la dose létale pour 50% des abeilles exposées par contact (DL₅₀) est comprise entre 0,004 et 0,075 µg/abeille.¹⁰⁷ Les mesures en laboratoire enregistrent les doses suivantes capables de tuer 50% des abeilles exposées par contact :^{482, 607, 620}

- 18 ng/abeille pour l'imidacloprid,
- 22 ng/abeille pour la clothianidine,
- 30 ng/abeille pour le thiamethoxam,
- 75 ng/abeille e pour le dinotéfurane,
- 138 ng/abeille pour le nitenpyram,

- 7,1 µg/abeille pour l'acétamipride,
- 14,6 µg/abeille pour le thiaclopride.

Les doses ci-dessus peuvent être une estimation optimiste, car ces molécules peuvent être renforcées par la présence d'autres pesticides. Dans le cas de l'exposition à l'acétamipride, la présence simultanée du fongicide triflumizole multiplie par 244 sa toxicité pour les abeilles et celle du thiaclopride par 1.141.⁴⁸² Un aspect important mais sous-estimé est que certains métabolites des néonicotinoïdes (oléfine, nitrosamines, 5-hydroxyimidaclopride) sont plus toxiques que les composés de départ.

L'acétamipride et le thiaclopride (appartenant à la catégorie des cyano-substitués) sont moins dangereux car ils sont inactivés par des systèmes de détoxification spéciaux présents chez les abeilles : le cytochrome P450.¹ En effet, l'inhibition du cytochrome P450 augmente la toxicité de ces composés (thiaclopride et acétamipride) entre 250 et 1.100 fois.¹⁰⁷ Le thiaméthoxame est rapidement converti en clothianidine, qui est donc un métabolite actif et toxique. Il suffit de 2,5 milliardièmes de gramme de clothianidine pour tuer 50% des abeilles exposées en moins de 48 heures (la deltaméthrine a une toxicité aiguë équivalente).³⁵⁵ Quatre milliardièmes de gramme d'imidaclopride génèrent une probabilité de 50% de tuer une abeille en moins de 48 heures ; pour obtenir le même effet avec un insecticide organochloré tel que le DDT, il faut une dose sept mille fois supérieure.²⁶⁰

La clothianidine est estimée être 10.800 fois plus puissante que le DDT, certaines études ayant montré qu'il suffit d'exposer une colonie à moins de cinq milliardièmes de gramme pour que la moitié des insectes meurent.^{166, 181, 183, 354}

Le DDT exerce efficacement l'action souhaitée par les agriculteurs, c'est-à-dire l'extermination des insectes, lorsqu'il est distribué à une dose d'au moins 200 à 600 grammes par 10.000 mètres carrés. Les néonicotinoïdes, bien qu'utilisés à une dose au moins 10 fois inférieure à celle du DDT, ont une action létale jusqu'à 1.000 fois supérieure. 7,5 g/ha pour la deltaméthrine, 50 g/ha pour la clothianidine, 75 g/ha pour l'imidaclopride sont suffisants.³⁵⁴ Les néonicotinoïdes sont donc beaucoup plus toxiques que les insecticides antérieurs tels que les organochlorés, même lorsqu'ils sont utilisés à des doses dix fois inférieures à ces derniers. Les néonicotinoïdes tuent l'insecte et persistent dans l'environnement. La molécule reste donc en circulation dans la biosphère et va rencontrer un autre insecte ou un autre être vivant et causer de nouveaux dégâts. Cela crée une chaîne très dangereuse qui cause également des dommages irréversibles aux humains.

LES EFFETS SUBLÉTAUX DES NÉONICOTINOÏDES SUR LES ABEILLES

Les doses auxquelles les effets sublétaux peuvent être mesurés sont beaucoup plus faibles que celles qui peuvent tuer les abeilles en moins de deux jours, par ingestion ou par contact. Les néonicotinoïdes, à des doses sublétales, génèrent plusieurs effets indésirables tels que des changements de comportement, une désorientation, des troubles de la mémoire et une inhibition de la recherche de nourriture. Il existe plusieurs effets sublétaux des néonicotinoïdes sur les abeilles :^{260, 261}

- Réduction de l'espérance de vie des adultes.

¹ Le terme cytochrome P450 désigne une famille enzymatique d'hémoprotéines présentes chez tous les êtres vivants (plus de 7.700 macromolécules distinctes sont connues), appartenant à la sous-classe enzymatique des oxydases à fonction mixte (ou mono-oxygénases). Les cytochromes P450 sont des acteurs majeurs de la détoxification, pouvant agir sur un grand nombre de substrats différents, tant exogènes (médicaments et toxines d'origine externe) qu'endogènes (déchets de l'organisme).¹⁶¹

- Altération de la mémoire et de la capacité d'apprentissage. Le thiaméthoxam à une dose de 0,1 ng/abeille réduit la mémoire olfactive.⁴⁸²
- Capacité réduite à communiquer et, par conséquent, efficacité réduite de la capacité de recherche de nourriture.
- Altération du système immunitaire.
- Réduction de la capacité d'orientation (un millionième de gramme suffit à réduire de 30% le taux de retour à la ruche, par rapport aux abeilles non traitées, et cette seule exposition peut être responsable d'une diminution significative du nombre d'abeilles dans la ruche).
- Retard dans le développement larvaire.
- Destruction de la flore intestinale, ce qui peut entraîner une malnutrition.

Les effets sublétaux, c'est-à-dire ceux qui ne tuent pas l'insecte mais altèrent des fonctions importantes comme la capacité à s'orienter ou à se déplacer, se produisent à des concentrations au moins 1.000 fois inférieures à celles qui entraînent la mort de 50% des individus en quelques heures.

La quantité d'imidaclopride capable d'avoir des effets sublétaux varie entre 0,1 et 2 ng par abeille, ce qui correspond à une concentration comprise entre 1 et 20 µg/kg (millionièmes de gramme dans un kilogramme).³⁶³ Cela signifie que de très faibles doses sont suffisantes pour enregistrer des changements dans le comportement des insectes, comme c'est le cas avec l'imidaclopride et ses métabolites (les métabolites de l'imidaclopride comprennent : le 5-hydroxyimidaclopride, le 4,5-dihydroxyimidaclopride, le desnitroimidaclopride, l'acide 6-chloronicotinique, les oléfines et les dérivés de l'urée).³⁷⁸

La clothianidine a une DL₅₀ pour les abeilles domestiques d'environ 4 ng correspondant à la concentration dans un sirop de sucre de 20 ppb. L'exposition des abeilles domestiques aux néonicotinoïdes tels que la clothianidine a été signalée comme ayant plusieurs effets indésirables :¹²³⁴

- Modification du comportement de *grooming*.
- Modifications de l'expression génétique dans les cellules neuronales.
- Troubles de la mémoire.
- Altération de la qualité du liquide séminal.
- Augmentation de la mortalité des abeilles ouvrières.
- Réduction de la masse des abeilles ouvrières de la colonie (de 21% à 20 ppb de clothianidine).
- Augmentation de la concentration de dioxyde de carbone à l'intérieur de la ruche (de 22% à 20 ppb de clothianidine ; ce gaz peut affecter la mémoire, le développement des ovaires et l'expression des gènes).
- L'exposition de la colonie à 5 ppb de clothianidine réduit la masse des larves mais cet effet ne se produit pas à des doses plus élevées (20 ppb).
- La clothianidine est toujours présente dans le miel six mois plus tard.

L'imidaclopride altère la capacité de thermorégulation de la colonie (même chez les bourdons) et réduit l'immunité sociale. En général, l'exposition aux insecticides néonicotinoïdes augmente la gravité des maladies causées par des parasites (tels que *Varroa* et *Nosema*).¹²³⁴

Pour tuer 50% des abeilles en moins de 48 heures, 60 ng d'imidaclopride par abeille, correspondant à 600 µg/kg, sont nécessaires ; pour tuer 50% des abeilles en moins de 96 heures, 40 ng/abeille, correspondant à 400 µg/kg, sont suffisants.³⁷⁸ Parmi les métabolites testés dans cette étude, le 5-hydroxyimidaclopride et les oléfines ont une toxicité aiguë similaire à celle de l'imidaclopride. Pour évaluer la toxicité chronique, les abeilles ont été nourries pendant 10 jours avec une solution de sucre contenant de très faibles concentrations d'imidaclopride (0,1 ; 1 ; 10

µg/L). 50% des abeilles sont mortes dans les huit premiers jours. En considérant que le sirop de sucre contenant l'insecticide et ses métabolites a été consommé à raison de 12 µL par abeille et par jour, après 8 jours, elles avaient consommé 0,01 ou 0,1 ou 1 ng par abeille (équivalent à des concentrations de 0,1 ou 1 ou 10 µg/kg). Le résultat alarmant est que la mortalité obtenue dans les tests de toxicité aiguë (de 50% des abeilles exposées en 2 ou 3 jours) peut être atteinte en seulement 8 jours en administrant des doses 30 à 30.000 fois inférieures pour les oléfines, 60 à 60.000 fois inférieures pour l'imidaclopride, 200 à 20.000 fois inférieures pour le 5-OH-imidaclopride et 1.000 à 100.000 pour les autres métabolites.³⁷⁸ Ces données confirment que l'exposition chronique à de faibles doses produit en quelques heures les mêmes effets que des doses des centaines ou des milliers de fois supérieures. Un milliardième de gramme pris quotidiennement suffit à tuer une abeille en moins de huit jours. Ces quantités sont si faibles qu'il est difficile de les mesurer instrumentalement en laboratoire, certaines des méthodes d'analyse les plus utilisées ne pouvant déterminer des doses aussi infinitésimales. On peut en conclure que la toxicité chronique est beaucoup plus élevée que la toxicité aiguë, car des doses mille fois inférieures tuent quand même les abeilles, mais en quelques jours de plus.

Il faut considérer que les plantes traitées avec des néonicotinoïdes (comme l'imidaclopride dans le maïs ou les graines de tournesol) contiendront ces molécules toxiques à vie. Ces substances contamineront également les cultures et les plantes sauvages des années suivantes en s'accumulant dans le sol : les insectes et les abeilles seront soumis à une exposition chronique constante. Les informations sur les effets sublétaux sous-estiment l'exposition réelle car les abeilles sont en contact avec des centaines de pesticides, certains plus toxiques que l'imidaclopride, comme le fipronil. Les effets synergiques et additifs pourraient donc réduire encore (de 10 ou 1.000 fois) les doses susceptibles de tuer les abeilles après une exposition chronique. La découverte de ces effets à très faibles doses, renforcés par des mécanismes synergiques et additifs, contredit le principe selon lequel c'est la dose qui fait le poison. Dans ce cas, l'augmentation du temps d'exposition ou du nombre de molécules entraîne des effets négatifs plus importants. Malheureusement, l'évaluation des dangers des pesticides effectuée avant l'autorisation d'utilisation sur le terrain ne tient pas dûment compte de ces résultats alarmants. En outre, les effets sur les insectes pollinisateurs sauvages pourraient être plus dévastateurs, car ils sont peut-être plus sensibles que les abeilles (ils ne bénéficient pas des avantages de la socialité et ne sont pas en symbiose avec les apiculteurs).

Le pouvoir destructeur de l'énorme quantité de pesticides systématiquement et largement distribués dans l'environnement est difficile à percevoir. On peut s'en faire une vague idée en supposant que chaque tonne de matière active, dans les premiers jours suivant sa distribution dans les champs, pourrait facilement tuer un nombre d'insectes égal à un suivi de 13 ou 14 zéros (10.000.000.000.000.000 : dix mille milliards) ; sachant qu'une colonie d'abeilles compte 40.000 insectes, cela signifie disposer d'un arsenal chimique potentiellement capable d'exterminer 250 millions de ruches en quelques heures. Ainsi, pour mesurer le pouvoir dévastateur des dizaines de milliers de tonnes de pesticides distribués chaque année, il faudrait utiliser les unités de mesure appliquées en astronomie : les abeilles qui pourraient être tuées suite au contact avec 20.000 tonnes d'imidaclopride (en supposant que 100% de la quantité distribuée atteigne la cible), placées côte à côte, pourraient former une ligne si longue que l'unité astronomique, c'est-à-dire la distance moyenne entre la Terre et le Soleil (environ cent cinquante millions de kilomètres) ne suffirait pas.

Pour se faire une idée de la gravité de la situation, on peut jouer avec les chiffres en effectuant un autre calcul théorique et approximatif, qui peut donner une mesure de la capacité potentielle d'extermination de l'imidaclopride. En Angleterre, en 2006, il a été utilisé sur environ 770.000 hectares et plus de 82.000 kg au total.⁶⁹⁷ Environ 106 g d'imidaclopride ont été utilisés par hectare. Supposons que seulement 1% de cette quantité atteigne la cible et qu'après avoir tué un insecte à une dose de 20 ng (20 milliardièmes de gramme), l'ingrédient actif ne retourne pas

dans l'environnement et ne peut pas nuire à d'autres organismes. Il s'agit de déployer une arme chimique qui peut potentiellement tuer plus de 70 millions d'insectes par hectare ; ce nombre énorme correspond à plus de 1.100 ruches de 60.000 abeilles chacune, pour chacun des 770.000 hectares. Supposons que nous utilisions la même quantité de DDT, soit 106 g par hectare, et que seulement 1% de cette dose atteigne les insectes. Si le DDT tue une abeille à une dose de 30.000 ng par insecte (correspondant à 30 µg par abeille), on peut supposer que l'on pourrait exterminer 50.000 abeilles par hectare. En réalité, le DDT a été utilisé dans des quantités 10 fois supérieures, ce qui signifie que plus de 500.000 abeilles pouvaient théoriquement être exterminées par hectare. Cette comparaison peut donner une idée du potentiel destructeur du DDT et de la façon dont il a été multiplié par plus de 140 au fil du temps, en tenant compte du fait que le DDT a été utilisé en plus grandes quantités par hectare, c'est-à-dire 10 fois plus que les néonicotinoïdes.

L'action néfaste persistante au cours des semaines ou des années suivantes est difficile à imaginer, mais certainement dévastatrice.

ASSURANCE TOXIQUE

Avec l'utilisation des néonicotinoïdes et d'autres ingrédients actifs (par exemple le fipronil), on assiste à une attaque chimique systématique des écosystèmes qui n'a jamais été enregistrée auparavant. Un effet secondaire dévastateur de ce type d'assurance chimique est que plus de 90% des champs, où les pesticides sont distribués lors des semis, n'en ont pas besoin. Les plantes succédant aux cultures traitées seront également contaminées par ces molécules car les principes actifs restent dans le sol. L'utilisation préventive de pesticides systémiques et hautement nocifs n'augmente pas la production des cultures sur lesquelles ils sont utilisés, comme dans le cas du maïs en Italie, mais cause en même temps des dommages irréversibles aux écosystèmes.⁴¹⁴ Il serait plus clairvoyant de trouver d'autres solutions, comme la souscription d'une assurance contre les pertes de récoltes dues aux ravageurs, plutôt que de distribuer des poisons sans évaluation phytopathologique préalable. Certains exemples concrets d'application de stratégies d'assurance alternatives ont permis de dépenser 7 à 10 fois moins que l'utilisation de semences traitées aux néonicotinoïdes.³⁰⁷ L'utilisation de néonicotinoïdes et d'autres pesticides doit être évitée. Les anciens principes de la lutte intégrée contre les parasites ont été oubliés. L'évaluation de la présence et de la quantité de ravageurs (par exemple, à l'aide de pièges à phéromones, d'échantillonnage de feuilles, etc.) et l'estimation des seuils économiques de dommages devraient être la pratique avant de distribuer des poisons. Utiliser des pesticides, dépenser des ressources économiques et polluer l'environnement, avant d'être sûr qu'ils seront d'une quelconque utilité, est également peu judicieux du point de vue des budgets agricoles : ils ne devraient être utilisés que lorsque les dommages économiques estimés dépassent des seuils de sécurité raisonnables et qu'il n'y a pas d'alternative. Si la valeur monétaire de la catastrophe environnementale et les problèmes de santé humaine sont pris en compte lors de l'estimation des dommages économiques, il serait facile de voir qu'ils ne devraient jamais être utilisés : le bilan serait toujours négatif (en supposant qu'il soit possible d'attribuer une valeur économique aux maladies et aux décès prématurés évités). Malheureusement, l'agriculture intégrée est devenue, dans le meilleur des cas, une méthode raisonnée de gestion des pesticides. En fait, cette méthodologie, même lorsqu'elle a été appliquée, n'a pas conduit à une réduction drastique de l'utilisation des pesticides.

Comme alternative à l'assurance contre les pertes de récolte, différentes stratégies pourraient être conçues, telles que la rotation des cultures et les cultures intercalaires, c'est-à-dire la culture simultanée de différentes plantes sur une même parcelle. Une autre stratégie est la lutte biologique, c'est-à-dire l'utilisation et la promotion des prédateurs des ravageurs (par exemple,

les insectes). La lutte biologique naturelle contre les ravageurs pourrait être facilitée par la présence de zones de végétation spontanée (zones de refuge, par exemple, pour les oiseaux insectivores). Une autre faiblesse du système agricole est que, souvent, le meilleur conseiller agronomique dont disposent les agriculteurs est aussi un vendeur de pesticides. L'absence d'une culture alternative est l'un des points critiques qui devrait être abordé systématiquement par le haut.

Des dizaines de millions d'hectares sont envahis inutilement par des molécules hautement toxiques et nocives, car la distribution a lieu avant qu'il y ait des signes évidents d'une attaque de ravageurs. Les néonicotinoïdes contenus dans les semences tuent les insectes pendant toute la durée de vie de la plante (ils imprègnent tous les tissus végétaux), sont persistants, restent dans le sol et contaminent l'eau. Ils tuent les insectes mais nuisent également aux oiseaux, aux poissons et aux amphibiens. De nombreuses espèces d'oiseaux sont insectivores et ont donc disparu en raison de la réduction de leur nourriture ou d'empoisonnements. Réduire préventivement l'utilisation massive des néonicotinoïdes ne nuirait pas aux agriculteurs et ne réduirait pas les rendements, mais permettrait d'éviter de nombreux problèmes. L'utilisation préventive d'insecticides systémiques dès le semis génère les effets négatifs suivants : ³⁴⁹

- Elle affecte les espèces non ciblées (par exemple, les pollinisateurs sauvages et les oiseaux).
- Favorise l'émergence de la résistance chez les espèces cibles.
- Elle favorise le développement d'espèces non ciblées qui, dans certains cas, bénéficient de la disparition des concurrents.
- Augmentation du coût des semences pour les agriculteurs : entre 2004 et 2011, les prix des semences de maïs et de soja aux États-Unis ont plus que doublé.
- La dépendance à l'égard de l'agriculture chimique s'accroît à mesure que les équilibres naturels sont modifiés de manière irréversible.
- Elle pollue le sol et l'eau.
- Contamine les plantes sauvages.
- Elle génère des effets négatifs sur la santé humaine.

L'industrie agrochimique encourage également l'utilisation de semences traitées avec des insecticides non néonicotinoïdes et d'autres pesticides tels que les fongicides et les nématicides. Il faut rappeler que la vente des semences est gérée par quelques entreprises (oligopole), qui ont un tel pouvoir qu'elles peuvent se permettre de réduire, voire d'éliminer du marché les semences qui n'ont pas été traitées chimiquement avec des pesticides (ou qui n'ont pas été génétiquement modifiées, par exemple pour résister aux herbicides).

Malgré l'utilisation généralisée de cette stratégie, qui est destructrice pour la biosphère dont nous dépendons, on ne sait toujours pas si ses avantages justifient ses nombreux inconvénients. C'est précisément ce que montre une étude : aux États-Unis, on estime qu'entre 34% et plus de 50% de toutes les superficies de soja utilisent des semences prétraitées aux néonicotinoïdes. ⁵⁸³ Aux États-Unis, le soja est traité à la clothianidine, à l'imidaclopride et au thiaméthoxame (insecticides néonicotinoïdes) et constitue, avec le maïs, l'une des plus importantes applications de cette catégorie d'insecticides. Les semences sont souvent traitées en même temps avec des fongicides. Il ne faut pas oublier que ces deux cultures peuvent être génétiquement modifiées pour être résistantes au glyphosate, un autre facteur de risque non négligeable. L'utilisation généralisée des néonicotinoïdes pour tuer les arthropodes nuisibles dans le soja ne génère pas les avantages souhaités, tels que l'augmentation de la production, qui devraient justifier l'empoisonnement de la biosphère. L'utilisation des principes de la lutte intégrée, tels que la surveillance de la présence d'organismes nuisibles et la mise en œuvre de traitements ciblés uniquement après le dépassement des seuils économiques d'intervention, produit des bénéfices plus importants, en termes d'augmentation de la production. La méthodologie des traitements antipoison préventifs, comme une sorte d'assurance, génère des

coûts et des dommages écologiques non justifiés et non compensés par l'augmentation des rendements. Selon cette évaluation, réalisée aux États-Unis, le traitement simultané des graines de soja avec des néonicotinoïdes et des fongicides génère une augmentation de rendement d'environ 130 kg de graines de soja supplémentaires par 10.000 mètres carrés ; les graines ont été traitées avec des quantités comprises entre 0,0756 et 0,2336 mg de fongicides et de principes actifs néonicotinoïdes par graine, et sont semées à une densité comprise entre 250.000 et 450.000 graines de soja par hectare. Cette densité de semences traitées se traduit par la distribution sur le terrain d'environ 105 g de matières actives par hectare.⁵⁸³ L'utilisation de néonicotinoïdes dans les semences, par rapport à des semences non traitées ou traitées uniquement avec des fongicides, génère une augmentation de rendement ne dépassant pas 190 kg par hectare, ce qui correspond à environ 5% de la production estimée à 3.500 kg/ha par an. En conclusion, ces petites augmentations de rendement ne génèrent pas une augmentation convenable de la rentabilité. Une limitation majeure, typique de cette méthodologie d'analyse économique, est qu'aucune valeur économique n'est accordée aux dommages environnementaux (par exemple aux espèces non ciblées) et à la santé. Malgré cette énorme lacune, l'analyse économique recommande de revoir cette pratique agricole toxique et coûteuse. Dans ce cas, l'utilisation des néonicotinoïdes n'augmente pas de manière significative et utile les rendements de la culture du soja, mais elle en augmente les coûts et les inconvénients pour l'environnement et la santé. L'application de bonnes pratiques agricoles telles que le choix de la date de semis, l'irrigation, l'utilisation des variétés les plus appropriées et le recours aux principes de la lutte intégrée contre les ravageurs peuvent générer des améliorations et des augmentations de rendement plus importantes.

Cette stratégie agrochimique préventive génère un désastre écologique sans précédent. L'importance et la nécessité d'une action immédiate sont soulignées dans une publication de 2018 signée par 235 auteurs qui appellent les gouvernements du monde entier à interdire l'utilisation des néonicotinoïdes.³³⁷ Il est nécessaire d'interrompre l'application des néonicotinoïdes utilisés aujourd'hui, mais il faut aussi empêcher la diffusion de nouvelles molécules et de stratégies entièrement similaires.

LA TOXICITÉ DE CERTAINS INSECTICIDES POUR LES ABEILLES

Le tableau suivant compare les concentrations de certains insecticides capables de tuer 50% des abeilles adultes exposées par ingestion ou par contact.^{585, 590, 591, 600, 678, 690} En outre, des molécules à action systématique sont signalées, c'est-à-dire celles qui sont absorbées et transportées dans tous les tissus végétaux, comme c'est le cas des insecticides néonicotinoïdes.

Molécule ¹	Oral DL ₅₀ (µg par abeille) ⁴	DL ₅₀ pour le contact (µg par abeille) ⁴	Utilisation sur les semences ³	Action systématique	Catégorie
Chlorpyrifos	0,25	0,059	OUI	NON	Organophosphates
Clothianidine	0,0038 - 0,0028	0,044 - 0,022	OUI	OUI	Néonicotinoïdes
Cyperméthrine	0,035	0,02	OUI	NON	Pyréthroïdes
Deltaméthrine	0,079	0,0015	OUI	OUI	Pyréthroïdes
Dinotefuran	0,023 - 0,0076	0,075 - 0,024	--	OUI	Néonicotinoïdes
Fipronil	0,0042	-	OUI	Modéré	Phénylpyrazoles
Imidaclopride²	0,081 - 0,0037	0,081 - 0,018	OUI	OUI	Néonicotinoïdes
Nitenpyram	--	0,138	--	OUI	Néonicotinoïdes
Thiamethoxam	0,005-0,004	0,024 - 0,030	OUI	OUI	Néonicotinoïdes

¹ Les doses létales par ingestion (DL_{50}) des autres molécules sont les suivantes :

- Insecticide organophosphoré diazinon : 0,09 $\mu\text{g}/\text{abeille}$.⁶⁰⁷
- Insecticide pyréthroïde lambda-cyhalothrine 0,038 $\mu\text{g}/\text{abeille}$.⁶²⁰

² Dans le cas des bourdons, la DL_{50} de l'imidaclopride, c'est-à-dire celle qui est capable de tuer 50% des insectes en moins de 72 heures, a été estimée à environ 0,02 μg par insecte (équivalent à 2 mg/kg).⁶⁹⁷

³ Les graines sont imprégnées de manière à éviter les traitements ultérieurs, car ces molécules vont se distribuer, au cours de la croissance de la plante, dans les tissus de la plante, la rendant toxique pour toute sa durée de vie (ex. : maïs).

⁴ La mortalité est généralement mesurée en moins de 48 heures.

Les doses rapportées sont approximatives et sont évaluées dans des conditions de laboratoire. La mortalité est enregistrée en moins de 48 heures. En réalité, les abeilles sont exposées à des mélanges complexes sur le long terme, et l'on sait que des concentrations 10 ou 100 fois inférieures à celles présentées peuvent générer une mortalité équivalente, mais sur une période plus longue, quantifiable en jours ou en semaines. La présence simultanée de certains fongicides ou parasites peut multiplier jusqu'à mille fois la toxicité des insecticides, générant ainsi les mêmes effets de mortalité à des concentrations plus faibles. Des effets synergiques ont été signalés entre le fongicide triflumizole et l'insecticide néonicotinoïde thiaclopride, et entre le champignon *Nosema* et certains insecticides comme l'imidaclopride.⁶⁷⁸ Des concentrations inférieures à 0,1 partie par milliard peuvent être capables de générer des effets dévastateurs. Certains pesticides génèrent des effets sublétaux importants à des doses de milliardièmes de gramme par abeille :¹³

- L'augmentation du nombre d'abeilles inactives était associée à l'exposition au fipronil (à une concentration de 2 $\mu\text{g}/\text{kg}$) et à l'imidaclopride (à une concentration de 1,5 milliardième de gramme par abeille).
- L'augmentation du nombre d'abeilles ne revenant pas à la ruche a été enregistrée en raison de l'exposition à 6 ng par abeille d'imidaclopride (néonicotinoïde) : 75% des abeilles ne reviennent pas à la colonie ; lors de l'exposition à deux milliardièmes de gramme par abeille de clothianidine, plus de 79% ne reviennent pas à la ruche.
- L'augmentation du temps de vol vers le distributeur d'eau et de sucre a été enregistrée lorsque les abeilles ont été exposées à un demi-milliardième de gramme de clothianidine par insecte.
- Des mouvements anormaux ont été enregistrés lors de l'exposition à un milliardième de gramme par abeille de clothianidine.

Les quantités nécessaires pour enregistrer des effets néfastes sont si faibles qu'elles sont difficiles à détecter par les instruments d'analyse en laboratoire, car ils mesurent des concentrations 10 ou 100 fois plus élevées.⁶⁸² Théoriquement, un gramme de thiaméthoxame (un insecticide néonicotinoïde) ou de cyperméthrine (un insecticide pyréthroïde) fournit une dose de poison susceptible de tuer au moins 25 millions d'abeilles exposées par contact en quelques minutes, tandis que la même quantité d'imidaclopride ou de clothianidine (un gramme) est susceptible de tuer plus de 125 millions d'abeilles exposées par ingestion en quelques minutes. Il est facile de comprendre pourquoi quelques grammes par hectare (en graines) peuvent être utilisés pour assurer un effet exterminateur d'insectes. Cet effet aigu s'exerce pendant les premières heures après l'exposition, mais si ces molécules restent dans l'environnement et circulent dans la biosphère (par exemple dans la chaîne alimentaire), l'action toxique sera perpétuée. Par conséquent, le nombre d'insectes tués, à long terme (semaines, mois ou années en fonction de la matière active), pourrait être supérieur de plusieurs ordres de grandeur. Les abeilles exposées par voie alimentaire à une dose de thiaméthoxame (insecticide

néonicotinoïde) égale à un dixième de celle qui tue 50% des insectes (DL_{50} d'environ 4,8 ng/ μ L) voient leur espérance de vie réduite de 41%.⁵⁹⁰ En résumé, quelques dizaines de grammes par hectare, répartis dans les graines, suffisent à générer une action dévastatrice pour toute la vie de la plante et également les années suivantes. Il faut également souligner les conséquences négatives pour les espèces non ciblées comme les abeilles solitaires, qui sont généralement plus sensibles à ces insecticides que les colonies d'abeilles domestiques. En effet, dans de nombreux endroits de la planète, comme dans certaines régions d'Europe, les pollinisateurs sauvages n'existent plus ou sont très rares. Ces informations devraient suffire à alarmer toute personne dotée de bon sens, et une communauté intelligente n'utiliserait donc pas ces armes chimiques. L'utilisation systématique de ces substances nocives contribue à la transformation de la planète en un monde de plus en plus inhospitalier.

LES PESTICIDES DANS LES PLANTES ET LES PRODUITS APICOLES

CONTAMINATION PAR LES PESTICIDES

Les pollinisateurs sont exposés à différentes molécules en raison de :

- des traitements phytosanitaires effectués sur les différentes cultures ;
- des traitements effectués par les apiculteurs ;
- d'une contamination environnementale généralisée qui expose les abeilles par la collecte de pollen, de nectar (y compris d'espèces sauvages contaminées), d'eau, de résine et de miellat.

Les abeilles sont exposées aux pesticides lors de la distribution, par l'eau contaminée (une famille d'abeilles domestiques en consomme jusqu'à 80-100 L par an) mais aussi par l'absorption de molécules systémiques contenues dans le pollen, le nectar, les gouttelettes de guttation, le miellat et la résine. L'exposition est toujours multiple et pour chaque molécule il est possible d'évaluer un quotient de risque donné par le rapport entre la concentration mesurée (par exemple dans le pollen en ng/g) et la dose létale qui tue 50% des insectes par ingestion (calculée en moins de 72 heures en laboratoire et exprimée en µg/abeille). Une autre façon d'essayer de quantifier le niveau de risque est de calculer le pourcentage de la dose létale pour 50% des insectes ou %DL₅₀ c'est-à-dire le produit de la concentration maximale mesurée (par exemple dans le nectar en ng/g) avec la quantité de nectar ingérée chaque jour (mg/abeille) divisée par la DL₅₀(orale ou de contact exprimée en µg/abeille). Une analyse de la littérature scientifique montre que 17 fongicides et 14 insecticides (en Europe et aux États-Unis) font partie des molécules qui présentent un risque élevé pour les abeilles en cas d'exposition via le pollen ou le nectar.¹²⁰⁰ Certaines molécules se retrouvent à des concentrations très élevées dans le pollen : l'insecticide carbofuran (1.400 ng/g), le fongicide dicarboximide iprodione (524 ng/g), les insecticides organophosphorés diméthoate (500 ng/g) et chlorpyrifos (100 ng/g), l'insecticide spinosad (isolé de la bactérie *Saccharopolyspora spinosa* ; 320 ng/g), le fongicide chlorothalonil (265 ng/g). Le nectar peut également présenter des concentrations élevées de certains pesticides : le diméthoate (1.595 ng/g), le chlorothalonil (76 ng/g), l'insecticide organophosphoré phorate (53 ng/g) et l'insecticide carbamate oxamyl (35 ng/g).¹²⁰⁰ Les insecticides néonicotinoïdes peuvent être trouvés à des concentrations dangereuses, par exemple le dinotéfurane 34,7 ng/g dans le pollen et 7 ng/g dans le nectar. Malheureusement, de nombreux résidus se retrouvent dans plusieurs cultures en même temps : 14 dans le colza (*Brassica napus*) ou 11 dans la fève (*Vicia faba*). Des pesticides, bien que souvent à des concentrations plus faibles, sont également présents dans le pollen et le nectar des plantes sauvages (par exemple, clothianidine, imidaclopride, thiaclopride, thiamteoxam). Globalement, on constate que le pollen contient plus de substances actives que le nectar. Il s'ensuit que les abeilles peuvent facilement être exposées à des doses définitivement dangereuses : entre 50% et 100% de la DL₅₀ orale et de contact pour le spinosad par l'ingestion quotidienne de pollen ; au-dessus de la DL₅₀ orale et de contact pour le diméthoate, l'imidaclopride et la clothianidine par le nectar. Les bourdons peuvent être exposés à des concentrations dangereuses : plus de 100% de la DL₅₀ pour l'imidaclopride et le diméthoate par l'ingestion de nectar ; 70% de la DL₅₀ pour le thiaméthoxame dans le nectar ; plus de la DL₅₀ par contact avec la clothianidine, l'imidaclopride et le diméthoate. Les concentrations élevées de diméthoate dans le pollen suggèrent des effets très dangereux également pour d'autres insectes comme les abeilles solitaires (par exemple *Nomia*). Aucune

information sur les herbicides ne ressort de cette étude car les données disponibles sur ces deux matrices : pollen et nectar, sont insuffisantes. De plus, seules quelques molécules réellement utilisées en agriculture sont recherchées, et aucune information n'est disponible sur les autres composés présents dans les mélanges commerciaux.¹²⁰⁰ Lors d'une seule frénésie alimentaire, les insectes peuvent être exposés à 14 pesticides différents en même temps, et les effets additifs et synergiques sont importants mais sous-estimés.

Il est utile de rappeler que dans de nombreux cas, les agriculteurs effectuent des traitements avec des mélanges, car ils peuvent distribuer plusieurs molécules simultanément dans les champs afin de réduire les coûts. Le nombre de matières actives distribuées en un seul passage peut être supérieur à neuf ; une moyenne de 2 à 4 matières actives distribuées en même temps a été enregistrée, selon que la culture est un légume ou un verger.⁶⁰¹ La fraction des surfaces cultivées traitées avec des mélanges complexes a augmenté au fil du temps. Ainsi, l'exposition aux pesticides a augmenté ; par exemple, au Royaume-Uni, des fongicides et des insecticides sont appliqués simultanément sur plus de 30% de la superficie des cultures maraîchères et 25% de la superficie des arbres fruitiers (en 2007).⁶⁰¹ Les abeilles domestiques peuvent être exposées à des dizaines de molécules en même temps et tout au long de leur vie. A ces molécules s'ajoutent celles utilisées par les apiculteurs, comme les acaricides et les fongicides. Ainsi, même dans les produits apicoles tels que le miel et la cire, il sera possible de trouver plusieurs ingrédients actifs en même temps (par exemple, des néonicotinoïdes et des fongicides, ou des néonicotinoïdes et des pyréthroïdes).

Les effets négatifs des pesticides sur les abeilles sont également reconnus officiellement à travers les mécanismes d'indemnisation prévus par diverses réglementations dans de nombreux pays comme l'Italie et les États-Unis ; dans ce dernier pays, l'indemnisation des dommages causés par les pesticides est prévue depuis 1967 et, jusqu'en 1980, des aides aux apiculteurs ont été accordées pour un montant d'environ 40 millions de dollars.⁹⁷⁴ Cette somme était bien plus élevée que celle consacrée à la recherche sur les abeilles au cours de la même période.

LES PESTICIDES DANS LE POLLEN

La quantité de pollen que l'on peut recueillir sur une colonie peut varier considérablement. Il a été constaté que les ruches situées à proximité de la culture de haricots peuvent collecter entre 10 et 96 grammes de pollen par jour.⁶⁰¹ Dans le cas de la culture de la vigne, 2.000 abeilles butineuses peuvent récolter jusqu'à 250 grammes par jour. On peut considérer que pour chaque kilogramme de pesticide distribué dans les champs, une concentration comprise entre 0,2 et 43 mg/kg peut être trouvée dans le pollen. Cette quantité est appelée *résidu par unité de dose* et il s'agit d'estimations approximatives qui montrent à quel point l'exposition peut être dangereuse. Pour avoir une idée du niveau de contamination possible, les concentrations de différents pesticides mesurées dans le pollen collecté par les abeilles butineuses à l'entrée de la ruche sont indiquées (en µg/kg) :

- Carbaryl : 15 - 240.
- Carbofuran : 2 – 11.517.
- Deltaméthrine : 7,5.
- Diazinon : 30 – 1.980.
- Endosulfan : 45 – 2.224.
- Fipronil et dérivés : 0,42 - 8.
- Imidaclopride : <0,5 - 36.
- Malathion : 240 – 7.640.
- Myclobutanil : 13,5 - 13,9.
- Parathion éthyle : 19,2 – 3.700.

- Parathion méthyle : 8 - 6.630.
- Penconazole : 17,6 - 23,6.
- Tau-fluvalinate (antivarroa) : 5 - 487.
- Tébuconazole : 12 - 16,5.
- Thiophanate de méthyle : 3.674.

Cette contamination de la colonie d'abeilles peut générer différents types d'effets négatifs, tant à court terme (à des concentrations plus élevées) qu'à long terme. Il est important de se rappeler que le pollen est la principale nourriture des stades juvéniles et constitue une source importante de protéines pour toute la colonie.

Le pollen peut transporter dans la ruche une quantité de pesticides 1.000 fois supérieure, voire plus, qui peut tuer 50% des abeilles adultes exposées par ingestion. De nombreuses études montrent le danger des résidus dans le pollen. Dans les ruches situées près de vergers de pommiers (en Slovénie), des concentrations dangereuses de pesticides utilisés dans le verger peuvent être trouvées dans le pollen. En particulier, le diazinon (un insecticide organo-phosphorique) peut être trouvé dans le pollen 10 jours après le traitement sur le terrain, à une concentration de 0,09 mg/kg, tandis que 0,03 mg/kg de thiaclopride et 0,01 mg/kg de difénoconazole peuvent être mesurés dans le pollen 6 jours après le traitement.⁶⁰⁷ Ces résultats confirment l'exposition des abeilles adultes et juvéniles à des doses sublétales.

Le tableau ci-dessous indique les concentrations mesurées dans le pollen prélevé sur les fleurs (résidus par dose unitaire).⁶⁰¹

Ingrédient actif	Méthode d'application	Concentrations de pollen (µg/kg)
Boscalid	<i>Spray</i> de 500 g de matière active par hectare dans le colza oléagineux	Jour zéro : 13.900 Jour 1 : 26.200 Jour 7 : 3.000
Captan	2.000 g de matière active par hectare dans les vergers de pommiers	Jour 3 : 18.970 Jour 12 : 40
Carbaryl	<i>Spray</i> de 1,1 kg de matière active par hectare dans la luzerne	240
Carbofuran	<i>Spray</i> de 1,1 kg de matière active par hectare dans la luzerne	Jour 1 : 10.183 Jour 5 : 233
Cyperméthrine	Dans le colza <i>oléagineux</i> à la dose de 44 g de matière active par hectare	Jour zéro : 1.900 Jour 1 : 110 Jour 2 : 70
Parathion d'éthyle	<i>Spray</i> de 1,1 kg de matière active par hectare dans les tournesols	Jour 1 : 3.700
Fluvalinate	144 g/ha	Jour 1 : 262 Jour 5 : 5
Iprodione	Deux traitements en culture de cerises (0,75 kg/ha en préfloraison et 0,188 kg/ha en floraison)	33,2 (maximum de 118)
Malthion	<i>Spray</i> de 210 mL de matière active par hectare dans le colza à pleine floraison	Une heure après la distribution : 5.700
Méthyl parathion (micro-encapsulé)	<i>Spray</i> de 1,1 kg de matière active par hectare dans la luzerne	Premier jour : 2.168 Jour 5 : 43
Pyréthroïdes (PP321)	<i>Spray</i> de 5 g de matière active par hectare dans le colza oléagineux	Jour zéro : 200 Jour 1 : 500 Jour 2 : 10
Procymidone	0,75 kg de matière active par hectare de fraises	Jour 3 : 31,1 Jour 9 : 4,9
Thiaclopride	96 g de matière active par hectare de verger de pommiers	Jour 1 : 90
Vinclozoline	375 g de matière active par hectare de cerises	393

On constate que les gamètes mâles des fleurs sont gravement contaminés par des substances toxiques. Ces données montrent que les concentrations dans le pollen peuvent varier dans le temps, diminuant et confirmant l'exposition dangereuse des abeilles et des pollinisateurs (ces molécules peuvent également générer des altérations des plantes et de la reproduction).

Dans une zone agricole du sud de l'Allemagne, une surveillance a été effectuée pour vérifier le niveau de contamination du pollen collecté par les abeilles (*Apis mellifera*). Un total de 260 pesticides (75 fongicides, 95 herbicides, 89 insecticides et 3 régulateurs de croissance végétale) ont été recherchés dans le pollen fraîchement collecté par des abeilles élevées dans une zone agricole où prédominent les cultures de pommes, cerises, vignes et prunes (entre avril et juillet 2018).¹²⁷¹ Dans le pollen collecté quotidiennement pendant 102 jours, 15 fongicides, 12 insecticides et 2 herbicides ont été détectés. Sur les 102 échantillons, seuls 13 n'ont pas enregistré les substances recherchées, et jusqu'à 13 pesticides ont été trouvés simultanément : la moyenne était de 5 substances actives par échantillon de pollen. Les concentrations variaient de 6 ng/g à 4.530 ng/g, la concentration la plus élevée ayant été enregistrée pour le fongicide tébuconazole (4.530 ng/g). Un autre fongicide, le fluopyram, a également été enregistré à des concentrations élevées (4.050 ng/g). La concentration totale de tous les pesticides se situait entre 3.300 et 8.800 ng/g de pollen. Deux herbicides ont été trouvés : la pendiméthaline (jusqu'à 1.810 ng/g) et le diméthénamide (jusqu'à 120 ng/g). Certains insecticides sont retrouvés à des concentrations élevées : le tébufénozide (à une concentration maximale de 410 ng/g), le fenoxycarbe (à une concentration maximale de 370 ng/g), le chlorantraniliprole (à une concentration maximale de 310 ng/g), le thiacloprid, le diflubenzuron et la picaridine. La présence de 12 insecticides dans le pollen, même à des concentrations élevées, suggère l'utilisation de ces molécules pendant la floraison (par exemple, le diflubenzuron et le fenoxycarb). Les pollinisateurs sont exposés à des mélanges complexes aux effets synergiques peu connus mais certainement négatifs.

LA CONTAMINATION DU POLLEN À LA SUITE DE L'UTILISATION DE SEMENCES IMPRÉGNÉES DE PESTICIDES

L'une des voies d'exposition consiste à semer des graines imprégnées de pesticides. Les abeilles sont exposées à la poussière et aux ingrédients actifs présents dans et sur les graines. Chez les abeilles exposées lors du semis de maïs traité à la clothianidine (insecticide néonicotinoïde), des concentrations comprises entre 101 ng/abeille (abeilles exposées à une distance de 9 m du semoir) et 1.394 ng/abeille (abeilles exposées à une distance de 1 m du semoir) ont été trouvées.⁶⁰¹ Les principes actifs distribués avec les graines restent dans les plantes tout au long de leur vie, ce qui les rend toxiques pour les insectes phytophages même lorsque le plant de maïs atteint deux mètres de haut. Ces molécules, comme les insecticides néonicotinoïdes, sont distribuées dans toute la plante et vont également contaminer le pollen. Le tableau suivant montre les concentrations distribuées dans les graines de colza, de maïs et de tournesol et celles trouvées dans le pollen.

Ingrédients actifs	Application	Concentrations de pollen ($\mu\text{g}/\text{kg}$)
Clothianidine	0,03 mg/semence de colza	2,59
Clothianidine	0,6 mg par graine de maïs	3,9
Imidaclopride	1 mg par graine de tournesol	13 (moyenne) 36 (max)
Imidaclopride	1 mg par graine de maïs	2,1
Thiamethoxam	1,2 mg/semence de maïs	Entre <1 et 15

Pour chaque kilogramme de pesticide distribué dans les graines imprégnées, des concentrations comprises entre 0,1% et plus de 4% peuvent être trouvées dans le pollen. Pour de nombreux ingrédients actifs utilisés pour imprégner les graines, les concentrations trouvées dans le pollen peuvent être supérieures aux doses capables de tuer 50% des insectes exposés par ingestion (DL_{50}) en moins de 3 jours.

LES PESTICIDES DANS LE NECTAR ET LE MIELLAT

Le nectar est collecté dans le tube digestif en quantités d'environ 60 μL , dont 10% peuvent être ingérés par l'abeille elle-même. Des concentrations de pesticides tels que le parathion peuvent être trouvées dans le nectar, à des doses de 0,005 μg par fleur dans le trèfle ou de 0,027 μg par fleur dans le chou. ⁶⁰¹ On estime qu'après la distribution de chaque kilogramme de pesticide par hectare, des concentrations comprises entre 5,3 mg/kg et 11,9 mg/kg peuvent être trouvées dans le nectar. Dans le cas des pesticides distribués par le biais de graines imprégnées, certaines études rapportent que pour chaque milligramme présent dans les graines, on peut trouver 0,05-0,075 milligrammes par kilogramme de nectar. ⁶⁰¹

Certains insectes phytophages tels que les pucerons produisent un miellat riche en sucres qui, dans certains cas, a pour fonction d'attirer des insectes tels que les fourmis avec lesquelles ils établissent une symbiose (certains pucerons produisent des sucres trisaccharides de type mélézitose). Les abeilles se nourrissent du miellat produit par des insectes tels que ceux qui appartiennent au groupe systématique des Sternorrhyncha (insectes de l'ordre des Rhynchota et du sous-ordre des Homoptera). ⁶⁵⁹ Ce groupe comprend les pucerons, les cochenilles, les aleurodes et les psylles. Ces insectes sont connus pour l'ampleur des dégâts qu'ils causent par la phytophagie et parfois aussi par la transmission de virus. D'autres insectes pollinisateurs recueillent également du miellat, comme les abeilles solitaires (*Osmia* : ce genre comprend environ 140 espèces d'abeilles dites solitaires) et les bourdons.

Le tableau suivant indique les concentrations de certains pesticides trouvés dans le nectar collecté sur les plantes ou dans le tube digestif des abeilles. ⁶⁰¹

Ingrédient actif	Méthode d'application	Concentrations dans le nectar (µg/kg)
Acéphate (et le métabolite méthamidophos)	<i>Spray</i> : 750 g de matière active par hectare un jour avant la floraison des framboises.	Jour 1 : 14.390 d'acéphate et 1.130 de méthamidophos ; Jour 11 : 800 acéphate et 90 méthamidophos
Acéphate (et le métabolite méthamidophos)	<i>Spray</i> : 750 g de matière active par hectare deux jours avant la floraison des cerisiers.	Jour 2 : 2.840 d'acéphate et 270 de méthamidophos ; Jour 7 : 1.690 d'acéphate et 140 de méthamidophos
Acéphate (et le métabolite méthamidophos)	<i>Spray</i> : 750 g de matière active par hectare un jour avant la floraison des pommiers.	Jour 7 : 1.400 – 8.440 d'acéphate et 150 - 650 de méthamidophos ; Jour 14 : 730 d'acéphate et 80 de méthamidophos
Clothianidine	Traitement des semences de colza (0,03 mg/semence)	2,24 (concentration maximale)

Les concentrations mesurées dans le nectar fraîchement récolté sur les fleurs ou dans l'estomac des abeilles sont inférieures à celles qui peuvent être mesurées dans le nectar stocké dans la ruche, car les abeilles procèdent à une déshydratation, c'est-à-dire à une diminution de la quantité d'eau. Pendant le stockage dans la ruche, la teneur en eau du nectar diminue et, par conséquent, la concentration de pesticides augmente.

PESTICIDES EN GOUTTES DE GUTTATION

Les gouttes de guttation, c'est-à-dire les gouttes de liquide sécrétées à l'extérieur par les plantes (par exemple sur les feuilles), peuvent également être une source d'exposition aux pesticides car cette eau est utilisée par les insectes. Les quantités suivantes de gouttes de guttation peuvent être recueillies dans certaines plantes : ⁶⁰¹

- grain : 6,4 µL/feuille ;
- orge : 64,8 - 5,6 µL/feuille ;
- tomate : 45,5 µL/feuille ;
- raisin : 56,5 µL/feuille ;
- riz : 62 - 110 µL/feuille.

Pour avoir une idée du niveau de contamination possible suite à différents types de traitements pesticides, quelques concentrations mesurées dans les gouttelettes de guttation produites par le maïs sont présentées. ⁶⁰¹

Ingrédient actif	Méthode d'application	Concentrations dans les gouttes de guttation (mg/L)
Clothianidine	Traitement des semences de maïs (0,5 mg/semence)	25 - 35 <i>(gouttes recueillies dans les 20 jours suivant le semis)</i>
Imidaclopride	Traitement des semences de maïs (0,5 mg/semence)	47 - 110 <i>(gouttes recueillies dans les 21 jours suivant le semis)</i>
Thiamethoxam	Traitement des semences de maïs (1 mg/semence)	11,9 <i>(gouttes recueillies dans les 21 jours suivant le semis)</i>

Les résultats présentés dans ce tableau et les précédents montrent que le nectar, le pollen et le miellat sont des véhicules pour les pesticides. Par conséquent, la distribution de pesticides entraîne la contamination de la chaîne alimentaire et porte atteinte au système de reproduction des plantes et des insectes. Déjà à un stade précoce de leur développement, les insectes seront exposés aux pesticides contenus dans des aliments tels que le pollen et le nectar.

A titre indicatif, pour chaque kilogramme de matière active par hectare, on trouve les ordres de grandeur suivants dans les différentes matrices : ⁶⁰¹

- 4,4 - 15,3 mg/kg de matière active chez les abeilles ;
- 0,002 - 21,1 mg/kg dans le pollen fraîchement récolté par les abeilles butineuses (jusqu'à 62,7 mg/kg dans le pollen stocké à l'intérieur des ruches) ;
- 0,05 - 11,3 mg/kg dans le nectar ;
- 0,4 - 1,2 mg/kg dans le nectar (miel) stocké dans les ruches.

Les abeilles et les insectes pollinisateurs sont exposés en permanence à de fortes concentrations de pesticides par leur alimentation. À cet égard, on estime que les bourdons (les ouvrières) peuvent consommer 30 mg de pollen par jour et entre 140 et 190 mg de nectar par jour, tandis que les larves consomment environ 22 mg de pollen par jour et 42 mg de nectar, elles consommeront donc des quantités dangereuses de mélanges complexes et nocifs.

PESTICIDES DANS LA CIRE

On trouve ci-dessous les concentrations de certains pesticides trouvés dans la cire prélevée dans les ruches d'*Apis mellifera*. ⁶⁰¹

Ingrédient actif	Application	Concentrations dans la cire d'abeille (µg/kg)
Acrinathrine		58-590
Amitraz	Acaricide utilisé par les apiculteurs	<1 - 1.820
Azinphos méthyle		228
Bromopropylate*	Acaricide utilisé par les apiculteurs	1 - 1.612
Chlorfenvinphos	Acaricide utilisé par les apiculteurs (200 mg/colonie)	730
Coumaphos	Acaricide utilisé par les apiculteurs (entre 30 et 250 mg par ruche)	1 - 235
Endosulfan		51-370
Fluvalinate	Acaricide utilisé par les apiculteurs	<1 - 100
Lindane		18,8 - 130
Malathion	Acaricide utilisé par les apiculteurs	<1 - 5
Roténone	Acaricide utilisé par les apiculteurs (1 g/colonie)	22.200
Tau-fluvalinate*	Acaricide utilisé par les apiculteurs	35 - 5.100
Tetradifon		32 - 580
Thymol	Acaricide utilisé par les apiculteurs (4.500 - 6.000 mg/colonie)	45.370

*On le trouve aussi dans la propolis.

LES PESTICIDES DANS LES ABEILLES EN RAISON DE L'EXPOSITION DANS LE CHAMP

Le tableau suivant présente certaines des concentrations de pesticides enregistrées chez les abeilles mortes après exposition aux ingrédients actifs utilisés par les agriculteurs dans les champs. ⁶⁰¹ Il est important de remarquer que les concentrations mesurées dans les abeilles mortes diminuent au fil des jours et que les abeilles sont tuées même lorsque l'exposition est inférieure à celle qui, en laboratoire, est capable de tuer 50% des insectes exposés par voie orale en quelques heures.

Ingrédient actif	DL ₅₀ (µg/abeille et µg/kg)	Exposition	Concentration mesurée dans les abeilles mortes
Carbofuran	0,16 ; 1.600	1,1 kg formulé par hectare de luzerne	3,317 µg/kg le premier jour Entre 33 et 250 µg/kg au jour 6
Cyperméthrine	0,37 ; 3.700	25 g de matière active par hectare	54 ng/abeille (540 µg/kg)
Parathion d'éthyle	0,175 ; 1.750	1,1 kg formulé par hectare de tournesol	3.600 µg/kg le premier jour
Malathion	0,27 ; 2.700	Spray à une concentration de 159 mL/ha	Entre 960 et 5.280 µg/kg
Méthyl parathion (microencapsulé)	0,165 ; 1.650	1,1 kg formulé par hectare de luzerne	Entre 762 et 2.500 µg/kg le jour 1 Entre 2 et 134 µg/kg au jour 6

DL₅₀ : indique la dose létale qui, en laboratoire, est capable de tuer 50% des insectes exposés par ingestion en quelques heures.

Malheureusement, les abeilles peuvent être contaminées par dérive, c'est-à-dire par des pesticides utilisés sur des cultures qui ne sont pas importantes pour les pollinisateurs. Les oliviers ne sont pas importants du point de vue des apiculteurs (les abeilles peuvent recueillir le pollen, mais la pollinisation est anémophile), mais les principes actifs utilisés pour traiter les maladies de ces arbres peuvent contaminer les fleurs sauvages et l'environnement, et se retrouver dans les pollinisateurs tels que les abeilles et les bourdons. Les contrôles effectués en Grèce (2017 et 2018) ont montré que les principes actifs utilisés pour lutter contre la mouche de l'olive (*Bactrocera oleae* ; la larve se nourrit du fruit de l'olivier mais l'adulte du nectar, du pollen et des solutions sucrées) peuvent se retrouver dans le corps des abeilles domestiques : le diméthoate (insecticide organophosphoré) jusqu'à 2,3 mg/kg (cette concentration est supérieure à la DL₅₀, c'est-à-dire la dose qui tue, dans des tests de laboratoire de 48 ou 72 heures, au moins 50% des individus exposés), l'ométhoate (un métabolite du diméthoate) jusqu'à 0,06 mg/kg et les pyréthroïdes bêta-cyfluthrine et cyhalothrine jusqu'à 0,63 mg/kg (la concentration de bêta-cyfluthrine mesurée chez les abeilles peut également être supérieure à la DL₅₀).¹²⁰⁷

Les concentrations maximales suivantes sont mesurées dans les olives : jusqu'à 0,64 mg/kg de diméthoate, jusqu'à 0,028 mg/kg de thiaclopride, jusqu'à 0,017 mg/kg de chlorpyrifos, jusqu'à 0,6 mg/kg de bêta-cyfluthrine et jusqu'à 0,024 mg/kg de cyhalothrine.¹²⁰⁷

En Grèce, les plantes présentes dans les oliveraies et attractives pour les pollinisateurs qui peuvent potentiellement être contaminées sont nombreuses : *Urtica spp.* (Urticaceae), *Parietaria officinalis* (Urticaceae), *Mercuria lisannua* (Euphorbiaceae), *Sonchus oleraceus* (Compositae), *Malva sylvestris*, *Uropermum picroides*, *Oxalis pes-caprae* (Oxalidaceae), ainsi que certaines plantes aromatiques (*Rosmarinus officinalis*, *Salvia officinalis*, *Thymus vulgaris*, *Cistus incanus*) et plantes ornementales (*Lantana spp.*). Les insecticides utilisés en pulvérisation ou sous forme d'appâts (l'insecticide est mélangé à des protéines et à d'autres substances) peuvent migrer vers d'autres plantes et être transférés aux abeilles et au miel (par exemple, la cyhalothrine à une concentration de 0,14 mg/kg dans le miel ; le diméthoate à une concentration de 0,002 mg/kg). Ces molécules peuvent également être détectées chez les bourdons : jusqu'à 0,7 mg/kg de diméthoate, jusqu'à 0,06 mg/g d'ométhoate et jusqu'à 0,005 mg/kg de cyhalothrine. En 2018, les plus fortes concentrations de diméthoate et de son métabolite sont trouvées chez les bourdons, confirmant que même les espèces sauvages peuvent être dangereusement contaminées.¹²⁰⁷

Il convient de souligner que certains insecticides, tels que le diméthoate, peuvent être distribués sous forme d'appâts attractifs, c'est-à-dire qu'ils peuvent contenir des substances, telles que des protéines, qui attirent également d'autres insectes, y compris les abeilles domestiques. Par

conséquent, ces pesticides pourraient également être consommés par des arthropodes autres que les insectes cibles, car ils sont mélangés à des attractifs.

Un problème émergent est la sélection d'insectes résistants aux organophosphates, comme c'est le cas de la mouche de l'olive contre des insecticides tels que le diméthoate.^{1211, 1212, 1213} C'est une autre bonne raison de changer de stratégie.

En raison de sa dangerosité (il est mutagène) et du développement de résistances par les organismes cibles, l'utilisation du diméthoate contre la mouche de l'olive est interdite en Italie depuis 2020 (en fait, une dérogation a été délivrée en 2020).

DES ÉTINCELLES DE SENSIBILISATION : LES EFFETS TOXIQUES DES PESTICIDES SUR LES ABEILLES ET AUTRES INSECTES UTILES

INTRODUCTION

Les pesticides, ainsi que la réduction de la biodiversité, figurent parmi les principales causes de mortalité des abeilles signalées dans le monde. Les cultures et les légumes peuvent être considérablement endommagés par les pesticides qui rendent les pollinisateurs malades. Un cas célèbre est la réduction de la production de myrtilles au Canada, une plante qui est pollinisée par plus de 70 espèces d'insectes indigènes, en raison de l'utilisation du fénitrothion dans les années 1970. ^{243, 361, 589}

Aux États-Unis, de 1947 à 2008, le nombre de ruches a diminué de 6 millions à 2,4 millions (National Agency for Agricultural Statistics). En Europe, 30 à 35% des ruches meurent chaque année. Pour confirmer dans quelle mesure les pesticides pourraient être impliqués dans cette mortalité, il faut savoir que plus de 150 ingrédients actifs de pesticides se retrouvent dans le pollen collecté par les abeilles. Parmi les molécules identifiées par certaines associations environnementales (par exemple *Greenpeace*) comme très dangereuses pour les abeilles et donc à interdire, figurent les néonicotinoïdes (imidaclopride, clothianidine, thiamétoxam), le chlorpyrifos, la cyperméthrine, la deltaméthrine et le fipronil.

Théoriquement, seuls les pesticides qui, à la suite d'évaluations toxicologiques, se sont révélés peu toxiques pour les pollinisateurs peuvent être utilisés pendant la floraison (cela est indiqué sur l'étiquette). Des précautions particulières doivent également être prises pour les plantes sauvages qui peuvent être en fleur à proximité des cultures traitées. Grâce aux fleurs sauvages, les abeilles peuvent être exposées aux traitements phytosanitaires autorisés dans les cultures qui ne sont pas en fleurs. Le risque peut être si grand que, dans certains cas, il est recommandé de couper ou de désherber chimiquement les plantes qui peuvent être en fleur à proximité ou dans les champs cultivés. Dans l'intention d'éviter d'intoxiquer ou de tuer les abeilles, les choses empirent en fait : la biodiversité est réduite, la disponibilité de nourriture pour les abeilles diminue et d'autres pesticides tels que les herbicides sont distribués.

Depuis au moins 1991 (directive 91/414/CEE), l'utilisation d'insecticides pendant la floraison est interdite, et tous les pesticides doivent être testés pour leur toxicité sur les abeilles avant d'être commercialisés. ^{24, 291} Malheureusement, la mesure des effets sublétaux, synergiques, cumulatifs et chroniques sur la colonie et de la bioaccumulation dans l'environnement et les chaînes alimentaires ne reçoit pas l'importance qu'elle mérite. A la nocivité des principes actifs s'ajoute celle de leurs dérivés, des adjuvants et des autres substances contenues dans les mélanges utilisés. Au moins 15 métabolites ont été signalés dans les produits apicoles, dont le sulfate d'endosulfan, le sulfone de fipronil, le 5-hydroxy-imidacloprid, le DDE et le sulfoxyde d'aldicarbe. Ce dernier est un métabolite de l'insecticide aldicarbe qui appartient à la catégorie des carbamates ; il est retiré du marché depuis 2006 et son métabolite a une action d'inhibition de la cholinestérase 76 fois supérieure à celle de la molécule de départ. ^{45, 500} Les concentrations les plus élevées de pesticides ont été trouvées dans la cire (concentration moyenne de 126 µg/kg), suivie du pollen (concentration moyenne de 66 µg/kg). Les ingrédients actifs suivants ont été trouvés dans la cire (dans plus de 50% des échantillons) : chlorfenvinphos, tau-

fluvalinate, bromopropylate, coumaphos et chlorothalonil ; tandis que les molécules suivantes ont été trouvées plus fréquemment dans le miel (dans plus de 50% des échantillons) : thiacloprid, thiamethoxam et acetamiprid. Les insecticides néonicotinoïdes sont les molécules les plus fréquemment retrouvées. Les pesticides phorate, diméthoate et carbofuran ont été trouvés dans plus de 5% des échantillons de nectar collectés sur les plantes traitées. Les pesticides utilisés par les apiculteurs pour lutter contre les acariens et les champignons se retrouvent également dans le miel, ce qui indique que la cire des rayons de miel peut libérer ces substances (coumaphos ou vinclozoline et, dans une moindre mesure, tau-fluvalinate). Concernant le danger par contact et par ingestion, l'analyse des risques réalisée par cette étude montre : ⁴⁵

- que le pollen présente un risque par contact avec les molécules suivantes : thiamethoxam, phosmet, chlorpyrifos, imidacloprid et clothianidin ;
- qu'un risque élevé par ingestion est posé par le thiaméthoxame et le lindane contenus dans le miel (ces deux molécules à elles seules, aux concentrations mesurées dans le miel, pourraient être responsables d'une augmentation de 50% de la mortalité des abeilles butineuses) ;
- que deux insecticides néonicotinoïdes, la clothianidine et l'imidaclopride (le premier est quatre fois plus toxique pour les abeilles que le second, mais on le trouve moins fréquemment et à des concentrations plus faibles), présentent également un risque très élevé par ingestion.

Un autre résultat intéressant est que sur les 124 pesticides trouvés dans le pollen, 70 ne se retrouvent que dans cette matrice et pas dans le miel. ⁴⁵ Dans le pollen, les molécules les plus fréquemment retrouvées (taufluvalinate, coumaphos, thymol et chlorothalonil) sont présentes à une concentration moyenne élevée (100 ng/g).

Sur les 77 ingrédients actifs présents dans le miel, 23 ont été trouvés dans cette seule matrice, et les insecticides néonicotinoïdes sont les plus faciles à trouver. Le miel contient les plus fortes concentrations de composés hydrophiles tels que le lindane et le coumaphos. En général, les composés hydrophiles sont plus toxiques par ingestion tandis que les composés hydrophobes sont plus toxiques par contact : les pyréthroïdes, qui sont hydrophobes, sont trois fois plus toxiques par contact que par ingestion. ⁴⁵

De nombreuses données sur divers bio-indicateurs soulignent l'état de détresse causé par l'utilisation de molécules toxiques en agriculture. Les pesticides à faible concentration rendent de nombreuses espèces malades. Certains effets enregistrés chez plusieurs espèces non ciblées sont rapportés : ^{442, 597, 601, 675}

- Sens de l'odorat compromis chez le saumon.
- Dommages causés aux chauves-souris.
- Dommages causés aux amphibiens par leur action en tant que perturbateurs endocriniens.
- L'imidaclopride réduit les interactions sociales chez les termites, comme la trophallaxie, le nettoyage (ils deviennent plus sensibles aux parasites) et la construction de tunnels. Il réduit également la vitesse à laquelle les aliments passent dans l'intestin et affecte la composition microbienne du tube digestif.
- Destruction des signaux nécessaires à la formation de la symbiose entre le système racinaire de la plante et les bactéries fixatrices d'azote dans le sol.
- L'herbicide glyphosate endommage les vers vivant dans le sol et affecte la croissance des micro-algues et des micro-organismes aquatiques ; il perturbe également la symbiose et l'équilibre entre les racines et les micro-organismes dans le sol.
- Chez la souris, l'imazalil (un fongicide également utilisé pour conserver les fruits ; par exemple distribué avec de la cire sur la peau des agrumes) génère des effets neurocomportementaux sur la reproduction.

- Certains pesticides, dont les néonicotinoïdes et le fipronil, sont soupçonnés de diminuer les défenses immunitaires et ont été associés à la propagation de maladies infectieuses chez les animaux sauvages.

Les pays adoptent des règles différentes concernant les concentrations maximales tolérées de pesticides dans le miel et les produits apicoles. L'Allemagne, l'Italie et la Suisse ont réglementé différentes limites maximales admissibles pour des pesticides tels que l'amitraz, le bromopropylate, le coumaphos, le cyamizole, la fluméthrine et le fluvalinate.⁴¹ L'Union européenne a fixé les limites suivantes pour l'amitraz, le coumaphos et le cyamizole : 0,2, 0,1 et 1 mg/kg. L'EPA aux États-Unis (US Environmental Protection Agency) a fixé les concentrations maximales admissibles à 1 mg/kg pour l'amitraz, 0,1 mg/kg pour le coumaphos et 0,05 mg/kg pour le fluvalinate. Les différentes réglementations en matière de prévention des risques sanitaires créent également divers problèmes dans le commerce : l'exportation ou l'importation doivent tenir compte du fait que les règles sont différentes.

LIMITES DE L'ÉVALUATION TOXICOLOGIQUE PRÉVENTIVE POUR LES ABEILLES

Les tests de toxicité aiguë permettent de mesurer la concentration qui tue 50% des abeilles par ingestion ; cela prend généralement un à deux jours. L'évaluation de la toxicité de contact est effectuée par des tests de laboratoire qui mesurent les effets au bout de quelques heures et jusqu'à 96 heures.⁴⁵ En général, la durée maximale des tests de laboratoire pour la toxicité, que ce soit par ingestion ou par contact, est de 96 heures, une seule application est faite ou une seule dose est administrée, des effets très graves sont mesurés comme la dose capable de tuer au moins 50% des abeilles traitées.⁷¹⁷ Les effets létaux immédiats sont mesurés, c'est-à-dire les effets les plus graves qui peuvent être enregistrés en quelques heures.

L'estimation des effets toxiques aigus tient compte de la concentration de pesticides dans, par exemple, le pollen (risque par contact et ingestion) et le nectar (risque par ingestion). Les abeilles butineuses entrent en contact avec environ 1 g de pollen par jour et en mangent 1,1 mg par jour. Les abeilles butineuses consomment jusqu'à 80,2 mg de miel par jour et les larves, qui se nourrissent exclusivement de pollen pendant 10 jours, en consomment 6,5 mg par jour. Ces informations peuvent fournir une aide précieuse pour estimer l'exposition par ingestion et par contact.⁴⁵

Grâce à l'utilisation de méthodes rapides, des informations sur la toxicité aiguë par contact et par ingestion sont disponibles pour la plupart des pesticides. Ces méthodes ne mesurent pas les effets chroniques, synergiques, sublétaux et sur l'ensemble de la colonie. Les informations sur les produits de transformation de ces molécules (par exemple, les métabolites) sont rares et insuffisantes. Certaines substances peuvent avoir des effets létaux sur les larves à des concentrations inférieures à celles considérées comme sûres pour les abeilles adultes. Des effets sublétaux peuvent être enregistrés suite à une exposition à des concentrations inférieures à des parties par milliard, c'est-à-dire 100 fois plus faibles que celles utilisées pour fournir des informations sur les effets aigus.⁸⁶¹

Les pesticides sont classés en trois catégories en fonction de leur danger pour les abeilles, déterminé par des mesures en laboratoire :^{17, 25}

- Ceux qui sont dangereux (comme le diméthoate, un insecticide organophosphoré) ; dans cette catégorie, la dose létale qui tue les insectes est inférieure à 2 µg/abeille.
- Ceux qui ne sont pas dangereux pour les abeilles (certains fongicides et herbicides) ; dans ce cas, la DL₅₀ (dose capable de tuer 50% des insectes exposés) est supérieure à 99 µg/abeille.

- Celles qui sont présumées dangereuses. Cette catégorie intermédiaire ne peut porter aucune allégation sur l'étiquette, ce qui entraîne une ambiguïté et une incertitude : le DDT et le chlordane (insecticides organochlorés) sont classés dans cette catégorie, bien que leur nocivité ait été démontrée.

Des situations graves se sont déjà produites, comme celle de l'endosulfan, déclaré inoffensif pour les abeilles par le fabricant, mais qui s'est avéré dévastateur. On pensait également que les néonicotinoïdes utilisés pour le traitement des semences ne pouvaient pas présenter de risque. L'histoire confirme que si la recherche scientifique n'est pas indépendante des grands intérêts économiques, elle produit des résultats soumis aux lois du profit.

Avant la commercialisation, il est difficile et coûteux d'évaluer les dommages dus à une exposition chronique, c'est-à-dire à de petites doses sur de longues périodes. Pour évaluer la toxicité chronique chez les abeilles, des modèles expérimentaux ont été proposés, comme l'administration de doses croissantes par voie orale pendant dix jours afin de déterminer les concentrations capables de tuer 50% des abeilles.⁶⁶⁸ Ces modèles expérimentaux ne sont pas encore largement utilisés et ne sont de toute façon pas en mesure de mesurer, dans les conditions de laboratoire proposées, les innombrables effets chroniques, sublétaux et synergiques qui pourraient être générés par des doses plus faibles. Certains examens préventifs permettent de mettre en évidence des effets sublétaux tels que l'immobilité, la perte de coordination des mouvements (par exemple, l'abeille tourne sur elle-même), la présence de mouvements anormaux (par exemple, un abdomen contracté), l'hyperactivité, l'agressivité et les vomissements.⁶⁶⁸ Après des expositions de quelques jours, des changements comportementaux peuvent être enregistrés à des doses inférieures à celles capables de tuer les abeilles en quelques heures.

Un modèle expérimental consiste à placer de petites colonies d'abeilles (6.000 individus) dans des tunnels (10 m x 4 m) dans lesquels elles sont exposées à des conditions qui simulent ce qui se passerait sur le terrain. Le tunnel peut contenir des fleurs qui attirent les abeilles et les pesticides peuvent être appliqués à la dose et de la manière souhaitées. Les colonies sont placées dans le tunnel pendant quelques jours, puis exposées aux pesticides.⁶⁶⁹ Sept jours après l'application du pesticide, elles sont placées à l'extérieur du tunnel. Pendant ces phases, elles sont observées pour enregistrer la mortalité, l'activité de vol et les conditions de la colonie telles que le développement des larves. Une des limites de cette méthode est qu'elle nécessite l'absence, dans un rayon d'au moins 3 km de la zone expérimentale, de cultures attractives pour les abeilles et, de plus, elle ne permet pas d'évaluer les expositions complexes auxquelles les colonies peuvent être soumises dans la réalité.

LES EFFETS SUBLÉTAUX DES PESTICIDES SUR LES ABEILLES

Malheureusement, il est très compliqué d'étudier en laboratoire les changements de comportement et les maladies générés par l'exposition à de faibles doses de pesticides sur des espèces individuelles, et il est encore plus compliqué d'examiner les effets sur le réseau complexe d'interactions entre les êtres vivants et les xénobiotiques dans des environnements naturels ou artificiels tels que l'agriculture. Les effets des petites doses et des interactions complexes des mélanges, qui évoluent tout au long de la vie, sont largement inconnus. Les insecticides peuvent persister longtemps dans l'environnement, même plus de 20 ans pour les néonicotinoïdes, mais beaucoup plus longtemps pour les organochlorés. En outre, de nombreux facteurs peuvent générer un stress chronique chez les insectes, renforçant ainsi les effets négatifs des pesticides.⁶⁷³ Par exemple, les parasites qui se nourrissent d'hémolymphe (l'équivalent du sang chez les insectes) affaiblissent les individus en augmentant les effets sublétaux des pesticides.

Pour mieux comprendre ce que l'on entend par effets sublétaux, un exemple est donné pour l'insecticide néonicotinoïde imidaclopride. Des concentrations d'imidaclopride d'environ 20 parties par milliard altèrent la capacité des abeilles (*Apis mellifera*) à chercher leur nourriture (pollen et nectar), tandis que 100 parties par milliard, pendant 30 à 60 minutes ou plusieurs heures, suppriment l'activité de butinage.⁶⁹⁰ Des concentrations de 50 parties par milliard réduisent la capacité à retourner à la ruche (l'orientation et la motricité sont altérées). Ces concentrations sont proches de 10 parties par milliard, qui sont celles enregistrées dans le pollen de tournesol, de maïs et de colza (la dose qui peut tuer 50% des abeilles exposées via l'alimentation se situe entre 3,7 et 81 milliardièmes de gramme par abeille).⁶⁹⁰ Si les concentrations auxquelles elles sont exposées dépassent 600 parties par milliard, 34% des abeilles ne reviennent pas à la ruche (elles disparaissent exactement comme l'indique la maladie connue sous le nom de "*mort subite et mystérieuse des abeilles* ou *colony collapse disorder*"). Une autre étude montre également le même effet.⁷⁴³ De très faibles concentrations d'imidaclopride (1,5 ng/abeille, ce qui correspond à environ 115 ppb dans le nectar) ou de clothianidine (environ 0,5 ng/abeille) réduisent l'activité de butinage (même de très faibles doses de fipronil, 0,3 ng/abeille, montrent le même effet).⁷⁴³ Dans cette étude, les abeilles ont été suivies à l'aide de micro abeilles qui enregistrent les mouvements des abeilles butineuses individuelles : elles ont été observées pendant plusieurs heures alors qu'elles se déplaçaient à quelques mètres de la colonie nourrie artificiellement (émetteur RFID mesurant 2 x 1,6 x 0,5 mm et pesant 4 mg). Lorsqu'elles sont exposées à 6 ng/abeille d'imidaclopride, c'est-à-dire la dose présente dans le nectar de tournesol produit à partir de graines traitées, au moins un quart d'entre elles ne reviennent pas à la ruche et des tremblements et une immobilité accrue sont enregistrés.⁷⁴³ Lors d'une exposition à 2 ng/abeille de clothianidine, des mouvements anormaux ont été enregistrés et seulement 20% des abeilles sont retournées à la ruche : la disparition des abeilles devient plus évidente à des doses supérieures à 1 ng/abeille. La clothianidine provoque des effets sublétaux à des doses inférieures à celles de l'imidaclopride et, à la fin de la publication, il existe des liens vers des vidéos (de quelques secondes seulement) qui montrent, de manière non équivoque et tristement impressionnante, l'altération des capacités motrices.⁷⁴³ Ces effets désastreux ont été enregistrés en suivant les abeilles dans un environnement artificiel dans lequel le distributeur de la solution sucrée, à différentes concentrations d'insecticide, était placé à 7 mètres de la colonie et les abeilles étaient suivies dans leurs déplacements pendant quelques heures. Les conséquences négatives sont probablement pires dans des conditions réelles où, par exemple, les mouvements sont plus longs et où les expositions et les facteurs de stress sont nombreux.

À de très faibles concentrations d'insecticides, les abeilles ont du mal à retourner à la ruche et mettent plus de temps à le faire. Cette recherche montre qu'avec des doses infinitésimales, l'intervalle de temps entre deux visites à la même source de nourriture est prolongé, le nombre de visites par unité de temps est réduit et la capacité à obtenir de la nourriture est altérée. Des doses de poison de 1/100.000.000 ou 1/10.000.000 du poids d'une abeille sont capables de générer des effets sublétaux graves (cela représente des milliardièmes de gramme par abeille, qui pèse environ 100 mg). Dans la poussière générée lors du semis de graines enrobées de néonicotinoïdes, on trouve des concentrations par mètre cube 10 à 100 fois supérieures (millionièmes de gramme) à celles capables de générer des effets sublétaux. Dans le pollen et le nectar, on trouve également des doses 10 à 100 fois supérieures aux doses minimales capables de produire des effets indésirables.⁷⁴³ Une graine enrobée peut contenir 0,5 mg d'insecticide qui pourrait potentiellement nuire (à une dose d'un milliardième de gramme par abeille) à 500.000 abeilles. Les insecticides néonicotinoïdes présents dans chaque graine individuelle pourraient constituer une dose suffisante pour endommager de manière irréversible plusieurs colonies d'abeilles. Ces calculs sont approximatifs et théoriques, mais ils doivent nous faire réfléchir à la toxicité potentielle.

On peut se demander quelle dose génère des effets sublétaux chez les oiseaux ou les humains. Si l'on suppose que les mêmes effets néfastes générés chez les insectes sont enregistrés chez l'homme à des doses un million de fois supérieures à celles qui nuisent aux abeilles, c'est-à-dire des millièmes de gramme au lieu de milliardièmes de gramme, cela ne change pas en fonction du poids corporel. Des doses équivalentes à 1/10.000.000 du poids corporel peuvent entraîner des effets indésirables tant chez l'homme que chez l'abeille (5 - 20 ng pour l'abeille et 5 - 20 mg pour l'homme).

D'autres preuves sont rapportées. Le thiaméthoxame, un membre de la famille des néonicotinoïdes, est administré artificiellement à des doses infinitésimales et provoque une réduction de la capacité des abeilles à retourner à la ruche.²⁴³ Les abeilles ont été nourries artificiellement avec une dose de 1,3 ng (milliardième de gramme) de thiaméthoxam et marquées avec une étiquette électronique sur le thorax (RFID).³⁸⁵ Les abeilles marquées ont été déplacées à une distance de 1 km de la colonie et leur capacité à retourner à la ruche a été mesurée (un détecteur enregistre automatiquement leur entrée dans la ruche). Entre 10,2% et 31,6% des abeilles exposées à des doses acceptables et sûres de thiaméthoxam ne sont pas retournées à la ruche. En réalisant une simulation informatique, les chercheurs français ont vérifié que la colonie aurait pu s'effondrer : suite à la fréquentation (butinage) du colza traité avec le principe actif, une réduction de plus de 50% du nombre d'individus aurait pu être enregistrée en moins de trois mois. L'utilisation de la molécule sur le colza a été interdite par le ministère français de l'agriculture, probablement en raison de ces preuves et des plaintes des apiculteurs.²⁴³

Les effets sublétaux des pesticides ne sont pas mesurés par les tests toxicologiques obligatoires sur les abeilles avant la mise sur le marché d'un pesticide, en partie parce qu'elles sont tuées par les concentrations plus élevées utilisées.^{17, 35, 682} Les effets sublétaux des pesticides sont ceux générés par des doses qui peuvent être 10 fois, 100 fois ou même plus faibles que celles qui sont létales en quelques heures. Ils peuvent également conduire à la mort de la colonie, mais dans un délai un peu plus long (semaines). Les pesticides sont commercialisés sans évaluation de ces effets sublétaux sur les organismes cibles et non cibles, en partie parce que, sinon, la plupart d'entre eux devraient être retirés du marché, ce qui serait respectueux de l'environnement, intelligent, altruiste, démocratique et tourné vers l'avenir. Le fait que, dans certains cas, les effets indésirables sont générés par des molécules autres que les ingrédients actifs, mais présentes dans les préparations commerciales de pesticides, est préoccupant. Cela peut expliquer en partie les différences observées entre les résultats obtenus en laboratoire, où l'on utilise le principe actif avec un haut degré de pureté, et ceux enregistrés sur le terrain, où toutes les molécules des préparations commerciales et d'autres substances sont présentes.

Les pages suivantes tentent de résumer et de cataloguer certains problèmes causés aux abeilles (*Apis mellifera*) à de très faibles concentrations, même si les nombreuses interactions entre les substances et les organismes sont difficiles à prévoir et largement inconnues. Cependant, les effets généraux sont très clairs et irréfutables.

RÉDUCTION DE LA CAPACITÉ D'APPRENTISSAGE OLFACTIF ET DE LA MÉMOIRE

De nombreux pesticides sont capables d'altérer la mémoire olfactive : les abeilles perdent ou voient diminuer leur capacité à faire la distinction entre une odeur connue et une odeur inconnue. Cette capacité, dans un monde sensoriel où les stimuli chimiques sont essentiels à la survie, est indispensable. La mémoire à long terme entraîne la génération de changements structurels dans les cellules nerveuses (par exemple, la création de nouvelles connexions) et,

dans le cas des drosophiles femelles (*Drosophila melanogaster*), les processus d'apprentissage fréquents augmentent la consommation d'énergie, entraînant une réduction de 40% de la production d'œufs.²⁵⁵

Les néonicotinoïdes entraînent une réduction de la capacité d'apprentissage : les abeilles ne distinguent pas les odeurs connues des odeurs inconnues (thiametoxam à une dose de 0,1 ng/abeille).^{13, 482} L'imidaclopride à très faible dose réduit la capacité de mémoire à moyen terme mais pas la capacité de mémoire à court ou long terme.⁶⁹⁵ Cet effet a été mesuré chez des abeilles conditionnées en évaluant la réactivité du réflexe d'extension du proboscis. L'association d'un stimulus tel que le stimulus olfactif avec une récompense (par exemple de l'eau et du sucre) est suffisante pour que la trompe s'étende à la réception du stimulus appris (par exemple, on peut stimuler l'odorat pendant 15 secondes avec du linalol, qui est un mono terpène présent dans l'essence de bois de rose et que l'on trouve libre ou combiné dans les huiles essentielles de coriandre, de basilic, de lavande ou de bergamote).⁶⁹⁶ Des associations répétées entre le stimulus et la récompense peuvent induire une mémoire durable qui, dans le cas des abeilles butineuses, se traduit par 4 jours. Les effets du conditionnement, c'est-à-dire la réponse de l'extension du proboscis suite au stimulus olfactif, ont été mesurés à différents intervalles de temps, entre 30 secondes et 24 heures. La dose de 12 milliardièmes de gramme d'imidaclopride, administrée dans une solution sucrée, induit une altération de la mémoire à court terme (entre 15 minutes et 1 heure) et augmente le métabolisme oxydatif dans le cerveau des abeilles. Cette dose d'insecticide est capable de détruire le fonctionnement de certaines cellules nerveuses impliquées dans la mémoire à moyen terme, mais pas celles impliquées dans la mémoire à long terme et à court terme.⁶⁹⁵ Il est donc possible de dire que l'insecticide, à des doses inférieures à celles capables de tuer, peut générer une sorte d'amnésie.

Le fipronil altère également la mémoire olfactive en réduisant la capacité de discrimination entre une odeur connue et une odeur inconnue.^{73, 178, 595} Des effets sublétaux ont été mesurés à des doses de 1/80 et 1/40 de la DL₅₀ (dose létale qui tue 50% des individus exposés par contact).⁷³ L'administration de fipronil par contact sur le thorax des abeilles à des concentrations inférieures à un milliardième de gramme (0,5 ng/abeille) peut altérer la mémoire olfactive et l'apprentissage olfactif.⁵⁹⁴

Les pyréthrinoïdes (deltaméthrine) réduisent également la capacité d'apprentissage des abeilles.⁵⁹³

Un autre effet sublétaux est attribué aux émissions des moteurs à combustion diesel. Les substances produites par les véhicules diesel réduisent la capacité olfactive des abeilles, diminuant ainsi l'efficacité de leur capacité à identifier les fleurs (grâce à des molécules attractives volatiles).²⁴²

ALTÉRATION DE LA CAPACITÉ D'ORIENTATION ET DE COMMUNICATION

Des altérations de la capacité d'orientation ont été signalées à cause des insecticides organophosphorés et pyréthroïdes, tels que la perméthrine et la deltaméthrine ; pour cette dernière substance, il a été démontré que les abeilles perdent la capacité de retourner à la ruche.³⁵ La deltaméthrine peut altérer la capacité des abeilles à s'orienter à des doses 27 fois inférieures à celles suffisantes pour tuer 50% des insectes exposés.⁵⁹² À très faible dose, les abeilles présentent également des problèmes de motricité et de coordination, ainsi que des problèmes d'apprentissage et de mémoire.⁵⁹² Cette étude a également révélé qu'après avoir exposé les abeilles à des concentrations d'insecticide capables de provoquer des altérations mesurables du comportement et de l'orientation, aucun résidu de l'ingrédient actif n'a été enregistré. Trois heures après l'enregistrement de la modification du comportement, il n'est pas possible de

mesurer la présence du pyréthroïde dans l'insecte : les substances actives peuvent générer de graves modifications biochimiques et physiologiques, même si elles se dégradent rapidement.

À des doses sublétales, les néonicotinoïdes (imidaclopride, clothianidine et thiaclopride) altèrent la capacité d'orientation des abeilles.^{75, 256, 375, 482} À de très faibles concentrations, l'imidaclopride, administré par voie orale et en dose unique, altère la capacité de communication des abeilles (*Apis mellifera*) et réduit leur mobilité.⁵⁹¹ De manière surprenante, l'altération du comportement enregistrée en laboratoire peut survenir 30 à 60 minutes après l'administration et cet effet peut s'estomper après quelques heures. L'exposition à une dose unique (20 microlitres à 100 ou 500 ppb par voie orale) peut générer des altérations temporaires du comportement.

Chez les abeilles ouvrières, de faibles doses de l'insecticide imidaclopride (1,25 ng par abeille) génèrent une augmentation de la mobilité, alors que des doses plus élevées (2,5-20 ng par abeille) entraînent une réduction de la mobilité : ce mode d'effet a été observé pour plusieurs néonicotinoïdes.^{589, 595} L'effet change avec la dose mais aussi avec le temps, de sorte qu'un comportement opposé est observé à différents moments.

L'étiquette d'un insecticide néonicotinoïde à base de thiaclopride indique : "... est sélectif vis-à-vis des pollinisateurs (abeilles et bourdons). Dans diverses études de laboratoire et de terrain [...], il s'est avéré sûr ou peu toxique pour de nombreux arthropodes utiles" ; en fait, des évaluations scientifiques ont montré que 64 milliardièmes de gramme par insecte sont capables d'altérer la mémoire, et qu'à des doses de 170 milliardièmes de gramme, les abeilles suspendent leur danse abdominale, c'est-à-dire que leur capacité à communiquer est compromise.^{254, 257} Le fabricant de l'ingrédient actif suggère une dose létale comprise entre 80 et plus de 230 fois la quantité capable d'enregistrer des effets sublétaux tout aussi graves (la DL₅₀ est de 15.000 nanogrammes par abeille). Cette expérience a démontré un fait bien connu en toxicologie, à savoir que les effets chroniques d'une substance toxique n'ont pas, en principe, de valeur seuil.

Une altération de la capacité à voler et d'autres anomalies ont été enregistrées pour de nombreux pesticides tels que les pyréthroïdes et les néonicotinoïdes. Les abeilles exposées à de faibles doses (sublétales) d'imidaclopride ou de deltaméthrine réduisent leurs vols à la recherche de nectar et de pollen de 20 à 90% et voient leur capacité d'apprentissage réduite.⁵⁹³

Une exposition pendant 11 jours à des concentrations de néonicotinoïdes inférieures à un dixième de milliardième de gramme par abeille est susceptible de générer des effets nocifs (les DL₅₀ de contact de l'imidaclopride, du thiaméthoxame et de la clothianidine varient entre 18 et 30 ng/abeille).⁵⁹⁵ Ces pesticides nuisent aux abeilles lorsqu'ils sont administrés par voie orale ou en mouillant le thorax. Un dixième de milliardième de gramme de thiaméthoxame par abeille (0,1 ng/abeille) est capable d'altérer la mémoire olfactive et la capacité d'apprentissage ; il faut rappeler que les effets négatifs du thiaméthoxame sont en partie dus à son métabolite, la clothianidine.⁵⁹⁵

De très faibles doses de clothianidine (néonicotinoïde) appliquées une fois (0,7 ng/abeille) altèrent la capacité des abeilles à retourner à la ruche.⁷³ Des doses plus faibles (0,47 ng/abeille) permettent aux abeilles de revenir, mais elles sont incapables de reprendre leur activité de butinage avant plusieurs heures.⁷³

Certains insecticides (par exemple le néonicotinoïde thiaméthoxam) à très faible dose augmentent le mouvement des abeilles vers la lumière.⁶⁶⁶

Le fipronil (insecticide phénylpyrazole) à la dose d'un dixième de milliardième de gramme par abeille, administré par contact ou par voie orale, provoque la mort de 100% des abeilles après une semaine d'exposition (0,1 ng/abeille correspond à un cinquantième de la dose capable de tuer 50% des abeilles exposées : c'est la DL₅₀).⁵⁹⁵ Après l'administration de doses encore plus faibles (0,01 ng/abeille, ce qui équivaut à un cinquantième de la DL₅₀), les abeilles restent immobiles plus longtemps (les capacités motrices sont altérées), ingèrent plus d'eau et réduisent le réflexe d'extension du proboscis.⁵⁹⁵ La capacité des abeilles à faire la distinction entre une odeur connue et une odeur inconnue est également altérée. De très faibles

concentrations peuvent produire le même effet que des concentrations plus élevées, mais dans un laps de temps légèrement plus long, et le fipronil s'est révélé plus toxique et plus dangereux que les néonicotinoïdes dans cette recherche.⁵⁹⁵

Il est possible d'étudier les effets sur le comportement en utilisant des fleurs artificielles qui produisent une odeur attirante pour les abeilles, qui peuvent fournir des substances sucrées avec ou sans pesticides (en laboratoire). La toxine de *Bacillus thuringiensis* (protoxine *CryIAc*) réduit le nombre de visites des fleurs (dans l'unité de temps).⁵⁹³ Cette toxine est produite par des plantes génétiquement modifiées telles que le maïs et se retrouve dans le pollen à des concentrations élevées.⁶⁵⁸

L'herbicide glyphosate réduit la capacité des abeilles à voler, mais aussi la sensibilité au sucre (la capacité à sentir le nectar), et interfère avec les capacités d'apprentissage.^{552, 718} L'exposition au glyphosate peut perturber la capacité des abeilles à retourner à la ruche.⁵⁵²

Les organophosphorés endommagent la transmission nerveuse, ce qui peut se manifester par une réduction de la capacité d'apprentissage et de mémorisation, et par des problèmes de contraction musculaire.

Chez les abeilles, l'amitraz, le formetanate et le chlordimeform suppriment le butinage à de très faibles doses.⁴⁸²

Une altération de la capacité à communiquer, telle qu'une altération de la capacité à localiser la nourriture, a été observée dans le cas des organophosphorés comme le parathion et des néonicotinoïdes comme l'imidaclopride.⁴⁸² Depuis 1970, on sait que l'exposition au parathion peut favoriser l'altération du comportement de danse que les abeilles effectuent pour communiquer la localisation de la source de nectar et de pollen.⁶⁸²

Les effets sublétaux des pesticides, que ce soit sur les individus ou sur l'ensemble de la colonie, peuvent être dévastateurs. Certaines des limites des études en laboratoire sont que l'on utilise un seul pesticide (pur) à la fois, que les tests de toxicité ne sont effectués que pendant quelques heures et que l'on utilise des concentrations beaucoup plus élevées que l'exposition réelle la plus probable. Chez les abeilles, les yeux sont composés de milliers d'unités appelées ommatidies et sont capables de percevoir certaines couleurs. Parmi les protéines photoréceptrices importantes pour la vision figurent l'opsine et la rhodopsine. Les abeilles possèdent en fait différents types d'opsine et de rhodopsine spécialisés dans la perception de différentes longueurs d'onde. L'expression correcte de certaines protéines est donc essentielle pour la vision des insectes. Une étude menée en Inde, entre les mois de mai et juin 2014, a mesuré les effets de certains pesticides (endosulfan, cyperméthrine, diméthoate) sur la capacité visuelle des abeilles (*Apis cerana*).¹²²⁸ Les chercheurs révèlent que l'exposition aux pesticides génère plusieurs altérations :

- la capacité de choisir les couleurs (par exemple, le bleu) est altérée ;
- la structure des ommatidies change (observations au microscope électronique) ;
- l'expression des protéines essentielles à la vision telles que l'opsine et la rhodopsine est réduite.

Ces résultats montrent que les pesticides peuvent altérer l'une des fonctions les plus importantes pour la survie des abeilles : la vision.¹²²⁸ Ainsi, les insecticides peuvent altérer de nombreuses aptitudes telles que la sélection des couleurs, l'orientation et le vol, contribuant ainsi à des effets létaux sur l'ensemble de la colonie.

AUTRES ALTÉRATIONS DU COMPORTEMENT

D'autres effets indésirables enregistrés chez les abeilles mellifères suite à l'exposition à certains pesticides sont décrits en résumé.

- Les effets neurotoxiques se manifestent par des mouvements erratiques, des tremblements et des paralysies suite à une contamination par des insecticides organochlorés et des pyréthroïdes.⁵⁵

- Le comportement agressif est encouragé par la contamination par les carbamates.

- La présence de l'insecticide chlorpyrifos était associée à une diminution de l'appétit.

- Une mémoire visuelle réduite a été enregistrée pour les insecticides néonicotinoïdes, le fipronil et le chlorpyrifos.⁴⁵

- Une altération de la capacité de régurgitation a été associée à l'exposition aux organophosphorés (les abeilles sont mouillées). Il convient de mentionner ici l'important phénomène de trophallaxie, au cours duquel les abeilles échangent de la nourriture en la régurgitant (les abeilles échangent du nectar et l'enrichissent en invertase : cette enzyme, en milieu acide, décompose le saccharose en ses deux composants, le glucose et le fructose).

- Les insecticides pyréthrinoïdes (perméthrine) génèrent une augmentation du temps consacré à l'auto-nettoyage et une réduction du temps consacré à des activités telles que la trophallaxie (la capacité à se nourrir est altérée).

- L'exposition à certains insecticides organophosphorés favorise la léthargie, c'est-à-dire un état de relâchement musculaire et de sensibilité réduite.

- Une hypothermie a été observée après une exposition par contact à des insecticides pyréthroïdes (deltaméthrine).¹⁹³ Certains fongicides présentent également ces effets, mais si les abeilles sont exposées simultanément à des insecticides (deltaméthrine) et à des fongicides (prochloraz), l'hypothermie et l'altération de la capacité de thermorégulation se produisent à des doses plus faibles.^{589, 592, 599, 866}

PROBLÈMES IMMUNITAIRES ET ENDOCRINIENS

Les effets sublétaux très dangereux comprennent l'altération des capacités de défense et la perturbation des délicats équilibres hormonaux qui régulent les fonctions vitales.

- Une immunité réduite, c'est-à-dire une sensibilité accrue aux parasites tels que les bactéries, les virus, les acariens et les champignons, a été observée en raison de l'exposition à l'insecticide chlorpyrifos et aux métaux zinc, plomb et cadmium.⁴⁷ Le cadmium peut bloquer les canaux calciques et endommager les muscles des abeilles.¹⁰⁷ Une immunité réduite peut également être générée par l'altération de l'expression génétique résultant de la présence de la clothianidine.⁴⁸³

- Certains pesticides, comme les fongicides prochloraz, triflumizole et propiconazole (ce sont des inhibiteurs de l'ergostérol), inhibent les défenses immunitaires des abeilles : ils réduisent l'activité du système de détoxification constitué par le complexe enzymatique du cytochrome P450.⁴⁸³

- Une réduction de la capacité à détoxifier certaines substances dangereuses a été signalée après une exposition au coumaphos, au thymol et à l'acide formique.⁴⁸³

- Les composés azolés sont des fongicides utilisés en agriculture et en pharmacie comme agents antifongiques. Ce sont, par exemple, le fluconazole, le clotrimazole, le propiconazole et le tébuconazole. Ces fongicides sont considérés comme des perturbateurs endocriniens car, par exemple, ils perturbent la synthèse des hormones

stéroïdes chez l'homme et l'animal ; chez l'abeille, ils inhibent des enzymes telles que l'*aromatase CYP19* et la synthèse de l'ergostérol. ⁴⁶

EFFETS NÉGATIFS SUR LA REPRODUCTION

De nombreux pesticides, y compris les acaricides utilisés par les apiculteurs, peuvent altérer la capacité de reproduction des colonies d'abeilles domestiques mâles. Certains insecticides (par exemple les néonicotinoïdes) réduisent la viabilité des spermatozoïdes des faux-bourçons. La réduction de la capacité de reproduction peut, au moins en partie, expliquer la nécessité fréquente pour les apiculteurs de remplacer la reine des abeilles dans les colonies, en anticipant sa mort naturelle. Certaines preuves scientifiques alarmantes sont résumées ci-dessous, notamment parce qu'il est probable que ces effets pourraient se manifester non seulement sur les abeilles mais aussi sur de nombreux organismes, y compris les humains.

- L'exposition à certaines molécules (par exemple le thiaméthoxam) entraîne une diminution du nombre d'œufs pondus par la reine des abeilles, ce qui conduit à l'effondrement de la colonie et/ou à la mort de la reine par les abeilles ouvrières. ³⁵ L'effet ovicide dans les ovaires de la reine des abeilles et l'effet larvicide ont été observés après une exposition au diflubenzuron (qui est un insecticide de la classe des benzoylurées). Certains herbicides (2,4,5 T et 2,4D) agissent également comme ovicides. ⁷¹⁷

- Les néonicotinoïdes (par exemple le thiaméthoxame et la clothianidine) entraînent une réduction de la taille des ovaires, une diminution du nombre de spermatozoïdes et de leur viabilité dans la spermathèque de la reine des abeilles. ¹¹⁷⁹ Le fipronil entraîne une réduction de la viabilité et de la concentration des spermatozoïdes.

- Les pyréthriinoïdes (par exemple la cyperméthrine) modifient la composition des œufs (réduisent la quantité de vitellogénine) et réduisent le taux d'éclosion des œufs (par exemple la deltaméthrine et la bifenthrine). ⁷¹⁷

- Les insecticides pyréthriinoïdes (deltaméthrine et bifenthrine), à très faible concentration, réduisent la fertilité chez *Apis mellifera ligustica* et provoquent un allongement de la durée de développement. ⁶⁹¹ La deltaméthrine génère également d'autres effets sublétaux tels que la paralysie des butineuses, la réduction des activités de butinage, la réduction de la viabilité des spermatozoïdes et l'altération de l'orientation nécessaire au retour à la ruche. ⁴⁵ Les doses recommandées pour l'utilisation de la bifenthrine en champ (20-100 mg/L) génèrent une exposition dangereuse possible, supérieure à la DL₅₀, et celles recommandées pour la deltaméthrine (12,5-25 mg/L) sont proches de la DL₅₀. ⁶⁹¹

- Les pyréthriinoïdes utilisés par les apiculteurs contre *Varroa*, comme le tau-fluvalinate (il est détoxifié par le cytochrome P450), provoquent une réduction de la taille des reines, tandis que les mâles (faux-bourçons) voient leur taux de survie diminuer et produisent moins de spermatozoïdes. ⁶⁰²

- Les colonies exposées au phénoxy-carbe génèrent des reines d'abeilles qui ne produisent pas d'œufs. ⁷¹⁷

- Le fongicide chlortalonil réduit la taille des reines, le nombre d'abeilles ouvrières et la biomasse de toute la colonie. ⁷¹⁸

- Les acaricides tels que l'amitraz, le coumaphos et le fluvalinate, ainsi que les pesticides chlorpyrophos et chlortalonil, provoquent une réduction drastique du nombre et de la viabilité des spermatozoïdes des faux-bourçons et une quasi absence de motilité. ⁹⁹¹ L'amitraz, le formetanate et le chlordimeform peuvent supprimer la reproduction. ⁴⁸² Le coumaphos réduit le poids des ovaires et de la reine des abeilles.

- Les acaricides autorisés en apiculture biologique, tels que l'acide oxalique et l'acide formique, provoquent également une réduction du nombre de spermatozoïdes et de la longueur des ailes chez les abeilles domestiques mâles.⁹⁹¹
- Les reines et les faux-bourçons exposés aux acaricides coumaphos et fluvalinate sont plus petits et ont une moindre vigueur sexuelle.⁵⁴
- Des réductions de la viabilité des larves ont été enregistrées par certains organophosphorés tels que le parathion et le méthyl parathion.

ALTÉRATION DU CYCLE DE VIE

La compromission du cycle de vie des abeilles est un autre aspect important car elle a de nombreuses implications négatives.

- Une réduction de la longévité a été observée suite à l'exposition à de nombreuses molécules différentes : les insecticides organo-phosphorés, tels que le malathion et le diazinon, le carbaryl et l'iprodione, un fongicide qui peut diminuer l'espérance de vie des abeilles de 10 jours.³⁹
- Suite à l'exposition à des insecticides à base de carbamate (carbaryl) et de pyréthroïde (resméthrine), un changement de l'âge auquel les abeilles commencent à butiner a été observé.
- Les effets sublétaux signalés chez les abeilles mellifères après une exposition au glyphosate comprennent une altération des rythmes circadiens (ainsi qu'une altération de l'apprentissage olfactif et une réduction des capacités d'orientation).⁸⁶
- Le recyclage de la cire contaminée par de faibles concentrations de pesticides a montré des effets sublétaux tels qu'une longévité réduite et un développement larvaire retardé.²⁴⁰ Les pesticides présents dans la cire passent dans les autres matrices de la ruche et dans la cire non contaminée (nouvelle), favorisant ainsi la distribution des molécules dans les rayons. En raison de l'utilisation de pesticides dans l'agriculture et l'apiculture, la cire peut être contaminée simultanément par plusieurs pesticides : dans cette recherche, une moyenne de 10 ingrédients actifs différents a été enregistrée, dans différents mélanges entre 39 ingrédients actifs et 7 métabolites.²⁴⁰ Parmi les pesticides les plus fréquemment retrouvés figurent les acaricides utilisés par les apiculteurs, qui se retrouvent dans la cire à des concentrations élevées : 22,1 µg/g pour le coumaphos.

LES PESTICIDES À ACTION ANTIMICROBIENNE

Le glyphosate est probablement l'herbicide le plus utilisé dans le monde et a également un effet antimicrobien sur certains micro-organismes qui ont des voies métaboliques similaires à celles des plantes (il altère la synthèse des acides aminés aromatiques). L'intestin des abeilles est principalement colonisé par quelques espèces de bactéries utiles et nécessaires à la santé des insectes (par exemple, les bactéries du genre *Lactobacillus* et *Bifidobacterium*). Comme chez les autres animaux, y compris l'homme, ces microbes intestinaux sont utiles pour la digestion et pour contrer les micro-organismes pathogènes. L'exposition des abeilles à des concentrations environnementales de glyphosate réduit l'abondance des micro-organismes intestinaux et augmente la mortalité.⁶⁷⁵ Les variétés bactériennes résistantes au glyphosate seront favorisées : à terme, certains micro-organismes seront réduits en nombre et d'autres favorisés, comme les antibiotiques. L'exposition au glyphosate rend les abeilles plus sensibles aux carences nutritionnelles et aux agents pathogènes (exerçant ainsi des effets négatifs en synergie avec d'autres facteurs).⁶⁷⁵

Les bactéries du tube digestif remplissent des fonctions fondamentales telles que la nutrition (par exemple, la digestion du pollen), la détoxification et l'immunité. Au moins neuf espèces bactériennes importantes ont été identifiées dans le tube digestif des abeilles (*Firmicutes*, *Proteobacteria*, *Actinomycetes*).⁷⁰⁵ Les antibiotiques ont la capacité de tuer certains types de bactéries et ont divers effets indésirables tels que la sélection de micro-organismes résistants. L'administration d'antibiotiques aux abeilles génère deux autres effets négatifs : elle réduit la capacité immunitaire, comme la résistance aux parasites tels que le champignon *Nosema ceranea*, et elle réduit la production de protéines à action antibiotique par l'insecte, car elles provoquent une immunosuppression (certaines protéines ayant cette fonction sont les suivantes : abaecin, defensin1 et hymenoptaecin).⁷⁰⁵ Cette observation confirme des connaissances également validées depuis des décennies chez l'homme, l'administration d'antibiotiques augmente la pathogénicité des parasites opportunistes, rendant les abeilles beaucoup plus vulnérables. Les abeilles auront une espérance de vie plus courte et les champignons pathogènes seront présents avec une plus grande intensité. La présence du champignon parasite endocellulaire (*Nosema ceranea*) n'influence pas à elle seule la composition microbienne de l'intestin des abeilles. Il existe donc des preuves d'un effet synergique entre la santé de la communauté microbienne intestinale des abeilles et la résistance aux maladies. Ce phénomène a également été observé chez les bourdons, la mouche à fruits (*Drosophila melanogaster*), ainsi que chez l'homme et de nombreux autres animaux (par exemple, les souris). Un aspect intéressant est que les abeilles exposées aux antibiotiques ont une espérance de vie plus courte que les abeilles non traitées, mais la présence simultanée du champignon (*Nosema*) réduit encore plus la survie.

Le microbiome intestinal remplit des fonctions fondamentales telles que la nutrition et la défense contre les agents pathogènes. Certains micro-organismes (*Acetobacteraceae*, *Lactobacillus* spp, *Bifidobacterium* spp, *Bartonella* spp, *Gilliamella* spp, *Snodgrassella* spp, *Frischella* spp) sont impliqués dans la digestion des monosaccharides, polysaccharides et autres fonctions importantes. L'altération de la flore intestinale affecte également la santé des abeilles : leur capacité à digérer les aliments ou à se défendre contre les maladies est réduite. Les pesticides (par exemple, l'herbicide glyphosate, les organophosphates, les néonicotinoïdes et les pyréthroïdes) peuvent avoir un effet négatif sur la qualité et la quantité du microbiome.¹²²⁹ Il en résulte une réduction de la capacité de survie des abeilles. L'exposition pendant plus de 5 semaines à de très faibles concentrations de néonicotinoïdes, tels que l'imidaclopride et le thiaclopride, altère de manière irréversible l'homéostasie du microbiome. L'abondance de certains micro-organismes (*Lactobacillus* spp et *Bifidobacterium* spp) dans l'intestin de l'abeille diminue et la composition est modifiée. Les insecticides néonicotinoïdes peuvent affecter les micro-organismes de plusieurs façons :¹²²⁹

- On sait que certaines bactéries peuvent utiliser les néonicotinoïdes pour obtenir du carbone et de l'énergie, comme les fixateurs d'azote (*Ensifer adhaerens* métabolise le thiaméthoxam et *Pigmentiphaga* spp l'acétamipride).
- Dans le sol, ils peuvent réduire l'activité du métabolisme et de la prolifération microbienne (par exemple, l'acétamipride et l'imidaclopride).
- Dans l'intestin, la modification de l'écosystème microbien, au profit de certains, génère des déséquilibres dans la capacité de défense immunitaire. En général, la biodiversité microbienne intestinale des abeilles diminue suite à l'exposition à ces molécules, ce qui favorisera les micro-organismes résistants.
- L'exposition des abeilles au thiaclopride peut altérer la composition de la flore microbienne intestinale (par exemple, la présence de *Lactobacillus* et de *Bombella apis* diminue) et réduire le poids corporel, la consommation de sucre et la survie.⁸⁸ Si la flore microbienne n'est pas endommagée de manière irréversible au fil du temps, elle peut se

reconstituer et atteindre des concentrations antérieures à l'exposition à de faibles doses d'insecticide aux propriétés bactéricides.⁸⁸

Ces effets, au niveau de la colonie, peuvent être dévastateurs à long terme et altérer l'écosystème du sol.

AUTRES ALTÉRATIONS

Les abeilles peuvent être exposées à des mélanges de poisons très complexes et les effets synergiques peuvent également être favorisés par la présence d'autres facteurs tels que certains parasites et la malnutrition. Nous ne connaissons probablement qu'une minorité des effets possibles ; les autres sont résumés ci-dessous.

- L'exposition aux pyréthroïdes (cyperméthrine) a été associée à des modifications de la glycémie et de l'activité de certaines enzymes (comme les *ATPases*).¹⁹³

- La deltaméthrine et le fipronil (à des doses sublétales) modifient l'orientation du vol des abeilles domestiques, qui se déplacent plus souvent dans la mauvaise direction, par exemple vers le soleil plutôt que vers la ruche.⁵⁸⁹

- Il a été signalé que les néonicotinoïdes (thiaméthoxam et imidaclopride) endommagent les cellules et les tubules intestinaux de Malpighi ; leur fonction est de libérer l'hémolymphe (l'équivalent du sang chez les insectes) principalement des déchets azotés qui sont déversés dans l'intestin.¹⁹³ Le thiaméthoxam (insecticide) administré dans l'alimentation, à une dose d'un dixième de la DL₅₀, provoque des problèmes au niveau des cellules intestinales, du cerveau (dommages morphologiques et histologiques aux zones importantes pour la vision et l'orientation) et réduit l'espérance de vie des abeilles de 41%.⁵⁹⁰ Ce néonicotinoïde, à des doses sublétales, réduit l'espérance de vie, altère l'orientation et la capacité d'apprentissage et réduit le sens de l'odorat. Le thiaméthoxame, utilisé dans les agrumes aux doses autorisées (au Brésil à une dose de 37,5 g de matière active dans 100 L d'eau), tue 50% des abeilles domestiques en moins de 214 minutes.⁵⁹⁰

- *Apis mellifera* et *Apis cerana*, exposées à des doses sublétales de diflubenzuron (un insecticide de la famille des benzophénylurées), ont subi une réduction de poids et un manque de développement des glandes hypopharyngiennes (qui produisent la gelée royale pour nourrir les larves et la reine des abeilles).⁵⁸⁹ Chez les abeilles nourricières, l'exposition à de faibles doses d'imidaclopride entraîne également une réduction des glandes hypopharyngiennes.³⁵

- La vitellogénine est une lipoprotéine présente dans l'hémolymphe. Elle intervient dans l'immunité, la reproduction et est nécessaire à la production de la gelée royale. La vitellogénine est une protéine aux propriétés antioxydantes et sa présence dans le corps des abeilles est associée à la longévité et à une bonne nutrition.²³⁰ La concentration de cette protéine pourrait être utilisée pour prédire la capacité des abeilles à survivre à l'hiver. Le pyriproxifène est un altérateur de croissance qui altère la capacité des abeilles à produire de la vitellogénine.¹³

- L'amitraz induit l'apoptose des cellules, également appelée mort cellulaire programmée.⁴⁸²

- Chez les abeilles, une altération de la fonction des cellules circulatoires, avec une réduction de la fréquence et de la force de contraction, a été associée à la présence de pyréthroïdes tels que la deltaméthrine.⁵⁸⁹

- Certains pesticides, comme le thymol et le menthol, utilisés par les apiculteurs contre les acariens (*Varroa*), sont considérés comme moins toxiques. En réalité, ces

molécules peuvent augmenter la mortalité de la reine des abeilles et favoriser l'élimination des larves. ⁶⁰²

▪ L'acide oxalique et l'acide formique sont considérés comme des molécules peu toxiques à utiliser contre les acariens qui parasitent les abeilles (par exemple *Varroa*) : ils peuvent être trouvés en petites quantités dans le miel. L'acide formique réduit l'espérance de vie des abeilles et diminue la survie des larves ; l'acide oxalique peut augmenter la mortalité des reines et endommager le couvain. ⁶⁰²

▪ Pendant les trois premiers jours de leur vie, les larves d'abeilles domestiques se nourrissent de gelée royale. Plus tard, les larves qui donneront naissance aux abeilles ouvrières recevront également du pollen et du miel, tandis que celles qui donneront naissance à la reine des abeilles continueront à recevoir des rations abondantes de gelée royale. La gelée royale est composée de divers nutriments tels que des protéines, des glucides et des lipides, notamment des photostéroïdes, qui sont importants pour la production d'hormones et la formation des membranes cellulaires. Les abeilles qui produisent la gelée royale doivent se nourrir de pollen. On pense généralement que la gelée royale, comparée au pollen ou au miel, est beaucoup moins contaminée par les pesticides (selon l'Agence américaine de protection de l'environnement, au moins 100 fois moins). En effet, les pesticides marqués au carbone 14 (carbofuran et diméthoate) sont principalement enregistrés dans le tube digestif et sont absents dans les glandes qui produisent la gelée royale. ¹²⁰²Cependant, même s'ils sont absents de la gelée royale, les pesticides peuvent générer des effets négatifs indirects tels que la réduction des glandes productrices de gelée royale et des changements dans la composition de la gelée royale. L'exposition artificielle à du pollen traité avec un mélange de pesticides (acaricides, herbicides, fongicides et insecticides) qui imite l'état que l'on peut enregistrer naturellement génère des variations dans la production de gelée royale. Les colonies nourries avec du pollen enrichi en pesticides (atrazine, azoxystrobine, carbaryl, chlorothalonil, chlorpyrifos, coumaphos, fenprothrin, fluvalinate et pendiméthaline) ont été comparées à d'autres nourries avec du pollen non enrichi. ¹²⁰² Après l'ajout de pesticides dans le pollen, on enregistre ce qui suit :

- une production plus faible de gelée royale ;
- la variation de la composition des lipides et des protéines telles que celles ayant une action antimicrobienne (au moins 80 protéines ont été identifiées dans la gelée royale, dont l'amylase, l'oxydase et la défensine, dont 56 présentent des variations significatives par rapport aux abeilles nourries avec du pollen non enrichi en pesticides).

Ces résultats montrent que même si les pesticides ne sont pas mesurés dans la gelée royale ou sont présents à des concentrations plus faibles que dans le pollen, il existe toujours des effets négatifs qui affectent la nutrition, principalement des reines d'abeilles. Les effets indirects peuvent être très dangereux.

Les études basées sur des *tests de* laboratoire ont largement contribué à répandre l'idée que les fongicides ne sont pas dangereux pour les insectes pollinisateurs tels que les abeilles (*Apis mellifera ligustica*). En raison de cette croyance établie de longue date, les fongicides peuvent être appliqués aux cultures pendant la floraison. Les pollinisateurs sont donc fortement exposés à cette catégorie de molécules. Le boscalid et la pyraclostrobine sont deux fongicides utilisés dans la culture des amandes en Amérique du Nord (ils inhibent la respiration dans les mitochondries des champignons). L'exposition via le pollen (en Amérique du Nord en 2018) à de très faibles concentrations de ces deux principes actifs génère une réduction de l'espérance de vie des abeilles ouvrières, une diminution de la taille des colonies (21% d'abeilles ouvrières en moins), une augmentation de la mortalité hivernale (30%) et incite les abeilles ouvrières à devenir des butineuses précoces (les abeilles peuvent être exposées via la nourriture, pendant la

floraison, notamment via le nectar) : l'exposition aux deux fongicides augmente la fraction d'abeilles ouvrières collectant du pollen. Certains effets sont mesurés à des doses bien inférieures à celles provoquant la mort de 15% des insectes exposés dans des conditions de laboratoire (DL₁₅). Une réduction du nombre d'abeilles ouvrières est également enregistrée à la dose de 10% de la plus faible concentration enregistrée dans le pollen.¹²³¹ Les résultats montrent que les très faibles concentrations (boscalid entre 1,5 et 6,1 ppm et pyraclostrobine entre 0,4 et 1,7 ppm dans le pollen), auxquelles les abeilles peuvent être exposées de manière réaliste sur le terrain, ont des effets significatifs sur la vie des colonies. Par conséquent, les fongicides peuvent nuire aux abeilles avec des effets sublétaux notables et évidents et la possibilité de les utiliser pendant la floraison doit être reconsidérée.

D'autres fongicides ont également été signalés comme ayant des effets négatifs sur les pollinisateurs, comme le chlorothalonil, qui entraîne une réduction de la génération d'abeilles ouvrières et l'émergence de reines plus petites dans les colonies de bourdons.¹²³¹ Les fongicides peuvent donc avoir des effets négatifs directs sur les pollinisateurs, contribuant ainsi à l'accélération de leur déclin.

Enfin, les problèmes que peuvent générer les substances mutagènes sont mentionnés. Les effets des altérations génétiques peuvent varier considérablement selon le type de mutation et l'endroit où elle se produit. Une mutation peut n'entraîner aucune conséquence. Si la mutation modifie les séquences codantes, c'est-à-dire les gènes, il peut y avoir un changement visible du phénotype. Certains pesticides sont mutagènes, c'est-à-dire qu'ils modifient les gènes et peuvent donc changer le phénotype. Chez les insectes, comme chez l'homme, certains pesticides favorisent l'apparition de défauts génétiques et l'altération de l'expression des gènes, comme chez les larves d'abeilles.^{47, 54,184} Un exemple est l'apparition d'abeilles présentant des malformations dues à l'exposition à des inhibiteurs de croissance tels que le pyriproxifène : à une dose de 54 ng/larve, 20% des abeilles présentent des malformations.¹³

LES QUANTITÉS INFINITESIMALES NUISENT AUX BOURDONS

Certains effets sublétaux enregistrés chez les bourdons sont résumés.

- Les néonicotinoïdes peuvent altérer la capacité de thermorégulation de la colonie de bourdons (*Bombus impatiens*) et la capacité à construire et isoler le nid avec de la cire (à des doses de milliardièmes de gramme par abeille ouvrière).⁶⁶⁷

- Chez les bourdons (*Bombus impatiens*), les insecticides néonicotinoïdes (imidaclopride) altèrent également la capacité à moduler la réponse immunitaire.³⁹⁸

- Des doses d'imidaclopride de 1 µg/L, c'est-à-dire 10 fois moins que ce que l'on peut trouver dans le pollen ou le nectar, réduisent d'un tiers la production de larves chez les bourdons (*Bombus terrestris*).^{418, 861}

- L'imidaclopride (insecticide néonicotinoïde), à des doses sublétales, chez les bourdons (*Bombus terrestris*) réduit la vitesse de croissance, altère la capacité de recherche de nourriture, diminue de 85% la génération de nouvelles reines et les colonies connaissent un taux de croissance plus faible.^{54, 368, 371, 442} Les interactions sociales sont également modifiées (*Bombus impatiens*).⁶⁶⁵ L'exposition à de très faibles doses peut affecter de manière significative le développement des colonies de ces insectes pollinisateurs.

- L'imidaclopride réduit la capacité des bourdons à se procurer de la nourriture et du pollen, et entraîne une réduction de la taille et une modification de la composition des colonies (par exemple, il provoque un changement dans les proportions numériques de différents individus tels que les larves et les faux-bourdons par rapport à d'autres castes

telles que les ouvriers). L'imidaclopride à des concentrations de 0,7 ppb dans l'eau sucrée et de 6 ppb dans le pollen réduit de 31% la quantité de pollen collectée par les bourdons.
420

- L'imidaclopride a été utilisé dans de nombreuses cultures telles que les tournesols, le colza, le maïs, les pois, les haricots et les vergers qui sont visités par les abeilles, de sorte qu'il peut être trouvé dans le pollen des plantes à des concentrations allant jusqu'à 10 ppb.⁶⁷⁴ L'administration artificielle d'imidaclopride à des bourdons (*Bombus terrestris*) à des concentrations pouvant être trouvées dans le pollen a entraîné les effets sublétaux suivants :⁶⁷⁴

- les colonies exposées à l'insecticide avaient moins de bourdons après 42 jours ;
- dans les colonies exposées à l'insecticide, les taux de natalité étaient plus faibles, tandis que les taux de mortalité étaient plus élevés (ces signes deviennent évidents 3 semaines après l'exposition initiale).

Les effets négatifs sur la capacité de survie de la colonie ne sont pas observés immédiatement après l'exposition, mais plusieurs jours plus tard : dans ce cas, les effets sont très évidents à partir de la troisième semaine. Les doses qui ne permettent pas d'enregistrer une augmentation de la mortalité en quelques jours ou quelques heures sont capables de produire des effets dévastateurs sur la fonctionnalité de la colonie après plus de trois semaines, compromettant sa survie.⁶⁷⁴ Ces effets sont visibles après des semaines et uniquement au niveau de la colonie, ils ne peuvent donc pas être mesurés par les tests de toxicité aiguë, qui analysent les taux de mortalité à des doses qui tuent les insectes en moins de deux jours et qui sont effectués sur quelques individus adultes. La situation s'aggrave si l'on ajoute d'autres facteurs tels que la pénurie de fleurs et les maladies.

Les insecticides néonicotinoïdes sont également très dangereux pour les bourdons (*Bombus terrestris* et *Bombus impatiens*) car ils peuvent avoir plusieurs actions négatives telles que :

- des interactions avec les récepteurs nicotiniques de l'acétylcholine car ils sont agonistes et ne sont pas inactivés par l'acétylcholinestérase, ce qui génère une stimulation beaucoup plus longue des canaux ioniques ;
 - l'altération de la méthylation de l'ADN ;
 - un dysfonctionnement mitochondrial ;
 - des modifications de l'expression de certains gènes (par exemple, la production de certains acides gras et hormones est réduite) ;
 - la réduction des défenses immunitaires ;
 - inhibition de la capacité à reconnaître le sucre (la capacité à reconnaître une source de nourriture est altérée) ;
 - l'altération de la capacité de reproduction (génération d'ovocytes plus petits et réduction du nombre d'œufs produits) ;
 - une altération de la capacité de thermorégulation ;
 - modification du comportement et de l'orientation en matière de recherche de nourriture.¹²³³

Ainsi, les néonicotinoïdes manifestent des effets létaux et sublétaux même chez les bourdons, ce qui peut compromettre leur capacité de survie.

LES EXPOSITIONS À DE FAIBLES DOSES CHEZ LES INSECTES UTILISÉS DANS LA LUTTE BIOLOGIQUE

Des effets sublétaux se produisent chez les abeilles d'élevage mais aussi chez les pollinisateurs sauvages et leurs ennemis naturels ; par exemple, des conséquences négatives ont été signalées chez les neuroptères de la famille des chrysopidés comme *Chrysoperla carnea*.⁶²⁵ Cette espèce est utilisée en lutte biologique car ses larves sont actives contre les pucerons. Des effets sublétaux, c'est-à-dire à des doses très faibles, ont également été enregistrés dans le cas de l'araignée-loup (*Lycosidae*), qui est un habile chasseur d'embuscades.^{589, 626}

Les insecticides utilisés pour tuer les pucerons dont se nourrissent les coccinelles génèrent des malformations chez les adultes qui ont été exposés au stade larvaire. Le même effet a également été enregistré chez d'autres insectes utilisés dans la lutte biologique, comme *Chrysoperla carnea*.^{589, 625}

Les pesticides à des doses sublétales peuvent affecter la reproduction des insectes utiles de plusieurs façons : le chlorpyrifos modifie le rapport mâle-femelle chez certains insectes hyménoptères qui se nourrissent d'autres insectes. Chez *Aphytis melinus*, il provoque une réduction du nombre de femelles. *Aphytis melinus* est originaire de Chine et a été introduit en Italie à la fin des années 1960. C'est un parasitoïde de la cochenille rouge (*Aonidiella aurantii*), un ravageur des agrumes. L'adulte ressemble à une petite guêpe jaune-orange d'environ 1 mm de long.⁶³² Après l'accouplement, la femelle pond ses œufs dans la cochenille des agrumes. Cette cochenille (*Aonidiella aurantii*) est originaire d'Asie du Sud-Est d'où elle s'est répandue dans toutes les régions productrices d'agrumes du monde.⁶³⁸ La femelle *Aphytis melinus*, en plus de parasiter les larves, tue la cochenille avec un ovipositeur afin de se nourrir de l'hémolymphe (qui sort de son corps). Le contrôle de la cochenille rouge par *Aphytis melinus* s'effectue en appliquant les principes de la lutte intégrée, ce qui implique la surveillance des cochenilles mâles à l'aide de pièges. Selon le degré d'infestation, plusieurs dizaines de milliers d'individus par hectare sont répartis.

Après une exposition au chlorpyrifos, la guêpe *Trichogramma brassicae* (hyménoptère entomo-parasitoïde), utilisée dans la lutte biologique, produit également une progéniture dont le *sex-ratio* est modifié en faveur des femelles.^{638, 654, 655} Les mâles de la guêpe *Trichogramma brassicae*, exposés à de très faibles doses de chlorpyrifos, sont moins attirés par l'hormone produite par les femelles (à la dose létale DL_{0,1} pour 0,1% des insectes exposés).^{589, 633} Cela modifie le potentiel de reproduction des insectes considérés comme utiles parce qu'ils se nourrissent de parasites des plantes. Cette guêpe est utilisée pour lutter contre la pyrale du maïs, le papillon nocturne *Ostrinia nubilalis*, car elle pond ses œufs dans les œufs de la pyrale.⁶³⁵ Bien qu'on l'appelle la pyrale du maïs, ce papillon (la chenille) est capable de se nourrir aux dépens d'au moins 250 plantes différentes, dont le sorgho, les poivrons, les aubergines, les haricots et certaines plantes à fleurs ornementales.

La guêpe *Trichogramma brassicae* est également capable de lutter contre d'autres ravageurs tels que la piéride du chou (*Mamestra brassicae*), un papillon nocturne qui peut endommager le chou-fleur, la blette, la tomate, le poivron, la pomme de terre, le tournesol, le tabac, les céréales, les plantes ornementales et les fruits à pépins.^{634, 636, 637} L'insecte peut être acheté par paquets de centaines de capsules, chacune d'entre elles contenant 3.800 œufs qui généreront 60% d'individus femelles.

Certains systèmes de lutte biologique peuvent également causer de graves problèmes aux insectes utiles. La guêpe *Trichogramma platneri* est utilisée en lutte biologique dans le monde entier car elle est capable de s'attaquer aux ravageurs (par exemple les œufs et les larves de papillons de nuit) de cultures telles que les pommes, les poires, les vignes, les avocats et est endommagée par les systèmes de lutte biologique tels que les savons, les huiles et le *Bacillus thuringiensis*.⁶⁵² Le *Bacillus thuringiensis* est une bactérie sporogène qui vit dans le sol. La

bactérie et ses toxines peuvent être distribuées dans l'agriculture biologique pour tuer certains insectes. Lorsqu'elle est ingérée par des insectes phytophages, la bactérie sporule dans l'hôte et libère des toxines dites Bt ou delta-endotoxines capables d'endommager le tube digestif des larves de diptères, comme les moustiques, ou de provoquer une maladie paralytique chez les chenilles de nombreux lépidoptères (ou papillons).⁶⁵³ Ces toxines biologiques (ce sont des protéines) sont utilisées dans la formulation d'insecticides pour l'agriculture biologique, mais sont également produites de manière autonome dans les tissus de plantes transgéniques (comme le maïs MON 810). Si l'on ajoute du sucre à la formulation commerciale avant de la pulvériser sur les parties vertes des plantes, elle est plus attrayante pour les larves. Les toxines de *Bacillus thuringiensis* distribuées sur les cultures non seulement tuent les proies (par exemple les papillons) de la guêpe utile à la lutte biologique (*Trichogramma platneri*) mais posent également des problèmes à la guêpe elle-même, en l'immobilisant.⁶⁵² La guêpe (*Trichogramma platneri*) est vendue dans des emballages contenant 100.000 œufs pour être utilisée dans les cultures de contrôle biologique.

La guêpe *Aphidius uzbekistanicus* (Hymenoptera Aphidiidae) est utilisée dans la lutte biologique contre les pucerons des céréales. Lorsque les adultes sont exposés à des insecticides pyrèthroïdes (deltaméthrine et lambda-cyhalothrine), ils génèrent une descendance avec un nombre réduit de femelles.⁶³⁸ Il convient de rappeler que chez de nombreux insectes, comme celui-ci et les abeilles, les femelles sont générées à partir d'œufs fécondés tandis que les mâles sont générés à partir d'œufs non fécondés (ils sont haploïdes). Certains insecticides peuvent altérer la capacité des femelles fertiles qui se sont accouplées à féconder leurs œufs pour produire d'autres femelles.⁵⁸⁹

Les pesticides peuvent réduire les capacités olfactives et d'orientation qui sont importantes pour atteindre la nourriture. Cette capacité peut donc également être réduite avec des effets spectaculaires, même à de faibles concentrations de certaines substances actives. Un exemple en est la réduction de la capacité d'une guêpe (*Aphidius rhopalosiphii*) à trouver son chemin vers le miellat dont elle se nourrit après une exposition à de faibles concentrations de deltaméthrine. Les pesticides réduisent la possibilité pour les prédateurs (guêpes parasitant des insectes tels que les pucerons produisant du miellat) de reconnaître les odeurs qui devraient les attirer vers leurs proies.⁵⁸⁹ Chez l'abeille également, certains pesticides (par exemple 1 ng de fipronil appliqué sur le thorax de chaque abeille) réduisent la capacité à reconnaître une solution sucrée (mesurée par le réflexe d'extension de la trompe).

Certaines substances actives réduisent l'intensité avec laquelle les insectes prédateurs (par exemple *Aphidius ervi*) utilisent leurs antennes pour explorer leurs proies, sans réduire leur mobilité. Ce comportement est important pour la reconnaissance des proies avant la ponte des œufs chez l'hôte.⁵⁸⁹

L'azadirachtine A est extraite des graines de l'arbre Neem (*Azadirachta indica*) et est utilisée en agriculture biologique comme insecticide, acaricide et nématicide. L'exposition à l'azadirachtine A réduit la capacité de certaines guêpes parasitoïdes (par exemple *Hyposoter didymator*) à traquer leurs proies.^{589, 656, 657} Même les guêpes (par exemple *Hyposoter didymator*) exposées à l'azadirachtine A peuvent s'éloigner de leur proie, exactement le contraire de ce qu'elles devraient faire pour se nourrir.

Les pesticides peuvent également altérer la reproduction par un autre effet. Des doses sublétales de certains pesticides peuvent altérer la capacité de ponte de certains insectes, comme c'est le cas pour la guêpe femelle *Aphidius ervi*, lorsqu'elle est exposée à la lambda-cyhalothrine à la dose DL₂₀, c'est-à-dire la dose qui entraîne la mort de 20% des insectes exposés. C'est un hyménoptère (Braconidae) utilisé dans la lutte biologique car c'est un parasitoïde commun de pucerons de différents genres.^{589, 643} Une altération de la capacité d'oviposition de la guêpe *Trybliographa rapae* a également été enregistrée.

Certains insecticides peuvent entraîner une réduction de la durée de développement chez les femelles et une augmentation de cette durée chez les mâles, c'est-à-dire qu'ils peuvent avoir des effets différents selon le sexe. Ce phénomène a été enregistré pour l'insecticide perméthrine sur certains insectes utiles (*Supputius cincticeps*), car ils sont des prédateurs de nombreux parasites des plantes.^{589, 627}

Certains pesticides, comme le phénoxy-carbe, agissent comme des hormones régulatrices de la croissance des insectes et endommagent également des insectes utiles comme *Chrysoperla carnea*.⁵⁸⁹

Les femelles de la guêpe parasitoïde *Neochrysocharis formosa* présentent une réduction de la ponte et de la capacité de reproduction lorsqu'elles sont exposées à de faibles doses d'imidaclopride ; chez cet insecte, l'imidaclopride a également un effet répulsif probable.^{647, 648} Cette guêpe est capable de parasiter les œufs et les larves de plus de 100 espèces appartenant à au moins quatre ordres (coléoptères, diptères, hyménoptères et lépidoptères comme le papillon de la tomate ou *Tuta absoluta*, arrivé en Italie en provenance d'Amérique du Sud il y a quelques années).

La capacité de ponte de la guêpe (hyménoptère parasitoïde) *Colpoclypeus florus* est altérée par certains pesticides tels que le spinosad, dont l'ingrédient actif est dérivé d'une bactérie du sol (*Saccharopolyspora spinosa*).⁶⁴⁹ Cette guêpe s'attaque aux papillons dont les larves affectent les cultures fruitières et la vigne (*Vitis vinifera*) : elle peut parasiter le papillon de nuit ou tortrix de la vigne (*Sparganothis pilleriana*) qui est répandu en Eurasie.^{589, 650, 651} La *Sparganothis pilleriana* s'attaque également à de nombreuses autres espèces comme le châtaignier (*Castanea sativa*), le sureau (*Sambucus nigra*), le coing (*Cydonia oblonga*), la pomme de terre (*Solanum tuberosum*), la luzerne (*Medicago sativa*) et le haricot (*Phaseolus vulgaris*).⁶⁵⁰ D'autres pesticides, comme le diflubenzuron utilisé dans les vergers de pommiers, produisent également des effets sublétaux sur cette guêpe utile.⁶⁵² Ainsi, une guêpe utilisée pour inhiber naturellement la croissance des papillons nuisibles aux cultures telles que les vignes ou les pommes est endommagée par les insecticides utilisés pour tuer ses proies.

La guêpe *Microplitis croceipes*, qui pond ses œufs dans le corps des chenilles de ravageurs comme celles du maïs (*Helicoverpa zea*), lorsqu'elle est exposée à l'imidaclopride (insecticide néonicotinoïde) ou à l'aldicarbe (carbamate), utilisés dans les cultures de coton, montre une réduction de sa capacité à répondre aux odeurs de 71% avec la première et de 62% avec la seconde matière active.

L'altération de l'odorat réduit la capacité d'orientation. Cet effet a été observé chez certains insectes utiles à des doses sublétales de deltaméthrine (*Trissolcus basalus*) et de lambda-cyhalothrine.⁵⁸⁹ La guêpe *Trissolcus basalus* parasite les œufs de la punaise verte (*Nezara viridula*), qui est un insecte phytophage.^{640, 641} Cette punaise a une forte polyphagie aux dépens de plus de 30 familles de plantes, tant monocotylédones que dicotylédones. Les punaises vertes passent l'hiver parmi les feuilles sèches, dans les haies, en attendant que le temps printanier leur permette de commencer leurs activités : elles se reproduisent et pondent leurs œufs en piquant leurs plantes hôtes. La punaise verte est probablement originaire d'Éthiopie et est maintenant répandue dans le monde entier. Comme la plupart des Hétéroptères, cet insecte émet une odeur plutôt gênante afin que les prédateurs ne l'approchent pas. C'est aussi pour cette raison que ses prédateurs s'attaquent à ses œufs plutôt qu'aux adultes. La guêpe *Trissolcus basalus* a la capacité de limiter les dégâts causés par la punaise, mais cette capacité est compromise par des doses sublétales de divers pesticides.⁵⁸⁹

Le papillon monarque (*Danaus plexippus*), célèbre en Amérique du Nord pour ses longues migrations (même sur plus de 2.000 km), et le papillon vanesse du chardon (*Vanessa cardui*), également connu pour ses voyages migratoires (de l'Afrique du Nord à l'Angleterre), sont endommagés par de faibles concentrations d'imidaclopride dans le nectar (entre 29 et 54 µg/kg).⁶⁹⁷

Les effets sublétaux sur certains insectes utiles comprennent une réduction de l'intensité avec laquelle ils attaquent leurs proies. L'insecte *Acanthaspis pedestris* (hémiptère hétéroptère) exposé à la cyperméthrine présente une attraction réduite pour ses proies : ses capacités de chasse sont réduites et la communication sexuelle importante pour la reproduction est compromise. Une guêpe parasitoïde (*Diaeretiella rapae*) devient également moins efficace pour la prédation après l'exposition (par exemple, elle réduira le nombre de tentatives de ponte).^{589, 646}

Malheureusement, de nombreux pesticides (par exemple, le carbaryl, la cyfluthrine, la deltaméthrine, l'endosulfan, le baytroid, le sevin) n'ont pas d'effet répulsif, de sorte que les abeilles n'évitent pas de pénétrer dans les champs traités.¹⁹³ Certains pesticides (par exemple le fipronil) réduisent la fréquence des visites des fleurs par les pollinisateurs tels que les abeilles domestiques.⁵⁸⁹ Dans certains cas, cependant, les pesticides ont également un effet répulsif (par exemple les pyréthroides et le diméthoate) sur les insectes qui mangent d'autres insectes comme la coccinelle septempunctata. Les insectes bénéfiques, dans ce cas, ne se dirigeront pas vers la nourriture, c'est-à-dire les insectes dont ils sont censés se nourrir (s'ils n'ont pas été tués par empoisonnement). Ils se nourrissent alors beaucoup moins de leurs proies (par exemple les pucerons), voire les régurgitent car elles sont devenues toxiques. Entre 53% et 80% des coléoptères *Nebria brevicollis* qui ont mangé des pucerons sur des plantes traitées à la deltaméthrine les régurgitent. La coccinelle commune (*Coccinella septempunctata*) est un insecte dont les larves et les adultes sont des prédateurs de pucerons ou d'autres petits insectes. L'agriculture biologique utilise des coccinelles dans la lutte biologique contre les infestations de pucerons, ce qui permet de réduire considérablement l'utilisation de pesticides (les œufs et les larves peuvent être achetés *en ligne*).

Les pesticides à des doses sublétales peuvent altérer la capacité de déplacement des insectes utiles. Certains insectes, lorsqu'ils sont irrités par la présence d'insecticides, marchent et se soignent plus fréquemment (les chimiorécepteurs à l'extérieur du corps sont probablement stimulés). Ce comportement a été observé chez la coccinelle (*Coccinella septempunctata*) après une exposition à la deltaméthrine.^{589, 628}

Les insecticides monocrotophos, diméthoate, méthyl parathion ou quinalphos, à des doses sublétales, génèrent un développement anormal du tube digestif, des testicules et des ovaires d'un autre insecte utile, car il se nourrit de larves d'insectes : *Rhynocoris kumari*.^{589, 629} Chez cet insecte, le monocrotophos et le méthyl parathion, à une dose d'un dixième de celle capable de tuer 50% des animaux exposés, génèrent une réduction de la capacité immunitaire (diminution des plasmocytes dans l'hémolymphe).

Les insecticides dieldrine et endosulfan, appliqués à une dose qui tue 30% des mouches des fruits (*Drosophila melanogaster*), réduisent les défenses immunitaires contre les larves d'un parasite (la guêpe parasitoïde *Leptopilina bouvardi*).^{589, 630, 631}

Il a été observé qu'une abeille solitaire (*Megachile rotundata*) exposée à des doses de pyréthriinoïdes égales à la DL₁₀ réduisait le nombre d'œufs de 20%.⁶⁹¹

CONSIDÉRATIONS SUR LES EFFETS SUBLÉTAUX

Ces observations permettent une autre réflexion : les abeilles mellifères d'élevage ne sont pas un bon bio-indicateur des effets négatifs des pesticides sur les insectes utiles tels que les abeilles solitaires, les papillons ou les insectes prédateurs nuisibles aux agriculteurs. Chez les abeilles domestiques, certains effets, comme ceux sur la reproduction, peuvent être atténués par le fait que la reine reste au sein de la colonie, protégée par des milliers d'abeilles formant une sorte de filtre protecteur. En outre, il peut être facilement remplacé en l'achetant à l'autre bout du

monde. Les abeilles domestiques peuvent aussi voyager en avion et ont un allié qui fait toute la différence, l'apiculteur.

En général, les insectes sociaux sont plus résistants à certains effets négatifs des pesticides que les insectes solitaires. Dans le cas des néonicotinoïdes, les colonies d'abeilles domestiques (plus de 10000 individus) étaient moins sensibles à de faibles doses que les colonies de bourdons, qui étaient à leur tour plus résistantes que les abeilles solitaires. Les abeilles solitaires ont montré les effets les plus graves aux mêmes doses de néonicotinoïdes. En outre, dans les mêmes colonies d'abeilles ou de bourdons, les mêmes doses sublétales d'insecticides génèrent des effets négatifs plus importants à mesure que la taille de la colonie diminue.⁶⁶⁵ Ainsi, il a été démontré que l'augmentation de la taille des colonies a un effet protecteur chez les insectes sociaux et que les mêmes doses sont plus dommageables pour les petites colonies et même plus dommageables pour les insectes solitaires.

Les effets des pesticides sur les insectes dépendent non seulement de facteurs tels que la génétique et l'environnement (température, mode de distribution des molécules toxiques, etc.), mais aussi de l'âge des abeilles. Il a été démontré que la sensibilité des abeilles à un insecticide pyréthroïde appelé cyperméthrine augmente avec l'âge : la DL₅₀ est multipliée par 2 avec l'âge. Le type de distribution et la formulation peuvent également influencer grandement le danger de l'ingrédient actif. Par exemple, le méthyl-parathion distribué sous forme micro-encapsulée, c'est-à-dire dans de minuscules granules en plastique (par exemple en nylon) ou en caoutchouc (granules de 20-40 µm, c'est-à-dire de la taille des grains de pollen), peut être toxique dans la ruche même 27 mois après sa dernière utilisation.^{35, 974} Les pesticides distribués à l'intérieur de ces micro-conteneurs (par exemple, des capsules en nylon) sont libérés très lentement et persistent donc plus longtemps. Lorsque ces micro-capsules sont distribuées pendant la floraison, elles peuvent être collectées comme s'il s'agissait de pollen (dans certains cas, elles ont la même taille, mais sont en plastique et insecticides).⁹⁷⁴

Plusieurs effets négatifs ont été présentés, qui se manifestent de différentes manières, comme la génération d'insectes malades destinés à mourir, la réduction de la capacité à obtenir de la nourriture, la réduction de la fécondité, l'altération de la capacité de communication nécessaire à la reproduction, l'altération des proportions numériques entre les sexes, la réduction de l'odorat, l'incapacité à s'orienter, la réduction de la mobilité et de la capacité à voler, la réduction de la capacité à chercher des proies et à chasser, et la réduction de la capacité à communiquer ; ce bilan résume une partie de ce que nous savons, mais les effets que nous ne connaissons pas encore peuvent être beaucoup plus inquiétants. Chacune de ces altérations est capable de générer des effets égaux ou supérieurs à ceux mesurés avec des concentrations capables de tuer les insectes en quelques heures, la différence étant qu'ils sont mesurés sur des périodes plus longues : jours, semaines ou mois et à des concentrations beaucoup plus faibles. De faibles doses de pesticides compromettent la capacité de survie des insectes, les rendant malades et les tuant lentement.

LES PESTICIDES UTILISÉS DANS L'ÉLEVAGE DES ANIMAUX

En médecine vétérinaire, certains pesticides, tels que les insecticides pyréthroïdes et les organo-phosphorés, sont utilisés pour lutter contre des parasites comme la gale ou des vecteurs comme les mouches. Les ingrédients actifs sont distribués sur les excréments, dans les locaux ou sur les animaux par les douches. Certains de ces composés peuvent être excrétés dans les effluents d'élevage et contaminer l'environnement (par exemple, l'eau).

Les apiculteurs du sud de la France, au début de l'hiver 2008-2009, ont enregistré la mort de plus de 4.000 colonies en montagne, loin des champs cultivés mais à proximité d'élevages ovins et bovins où des traitements vétérinaires obligatoires ont été effectués (par exemple, des

insecticides pour lutter contre les vecteurs de maladies comme le virus de la fièvre catarrhale ovine). Des pyréthrinoïdes (perméthrine et deltaméthrine) utilisés pour lutter contre les insectes vecteurs de parasites (virus de la fièvre catarrhale du mouton) ont été enregistrés dans les abeilles mortes.¹¹⁷²

En France, plusieurs insecticides sont autorisés dans le secteur de l'élevage, utilisant principalement les substances suivantes : amitraz, cyperméthrine, deltaméthrine, dicyclanil, dimpylate, fenvalerate, fluméthrine, phoxime. En outre, on utilise des médicaments contre les parasites qui peuvent contenir les molécules suivantes : ivermectine, doramectine, éprinomectine, moxidectine, clorsulone, closantel, praziquantel, triclabendazole. Plusieurs anthelminthiques sont utilisés et peuvent contenir : albendazole, closantel, febantel, fenbendazole, levamisole, netobimine, nitroxinil, oxfendazole, oxyclozanide, pipérazine, praziquantel, pyrantel et triclabendazole.¹¹⁷² Certaines de ces substances sont connues pour leurs effets toxiques sur les abeilles : cyperméthrine, deltaméthrine, fluméthrine, ivermectine et moxidectine. D'autres sont connus pour avoir des effets négatifs sur les insectes coprophages et les organismes aquatiques.

Les effluents d'élevage sont traités avec des insecticides (larvicides tels que la cyromazine et le diflubenzuron) contre les larves de mouches (*Musca domestica*). Le fumier est utilisé pour fertiliser les plantes et, de cette façon, les substances dangereuses qu'il contient sont également distribuées.

Le traitement des moutons, des bovins ou des porcs avec de l'ivermectine (une molécule toxique pour les abeilles) entraîne des concentrations élevées de cette molécule dans les fèces (une semaine après l'injection sous-cutanée).¹¹⁷² La cyperméthrine peut également être trouvée en concentrations élevées dans les fèces des bovins traités trois mois après l'administration. Certaines des substances utilisées et leurs métabolites peuvent se dégrader très lentement dans l'environnement : 217 jours dans le sol pour l'ivermectine. Le fumier de bovins contenant de l'ivermectine met beaucoup plus de temps à se dégrader : 340 jours au lieu de 80 jours. Cela ralentit la vitesse de décomposition de la matière organique. Des effets négatifs sur les insectes coprophages sont également enregistrés, comme on peut s'y attendre de la part de molécules insecticides.

Les abeilles ont besoin de plusieurs dizaines de litres d'eau par an (entre 30 et 70 L). Elles peuvent la prendre dans un rayon d'environ un kilomètre autour du site de leurs colonies. On sait depuis longtemps que les abeilles ont une préférence pour les sources d'eau riches en sodium, en ammonium et en magnésium, comme dans le cas des flaques d'eau remplies de matières organiques en décomposition, telles que les eaux usées et le lisier. Ainsi, l'eau contaminée par des insecticides et des médicaments est utilisée par les abeilles, qui peuvent également boire directement dans les excréments.

Des substances utilisées en médecine vétérinaire sont ajoutées aux molécules distribuées pour traiter les maladies des plantes. Ainsi, les effets synergiques et additifs potentiels, largement inconnus, sont favorisés. Pour preuve de l'existence de ces risques, durant l'hiver 2013-2014, les apiculteurs français ont enregistré une augmentation de la mortalité des colonies où des substances telles que les néonicotinoïdes (utilisés en agriculture) et les pyréthrinoïdes (utilisés en agriculture mais aussi en élevage comme la cyperméthrine) ont été retrouvées.

Les effets sublétaux rapportés à partir de très faibles doses de certaines de ces substances sont :

- une réduction de la mémoire olfactive due à l'exposition à l'ivermectine ;
- perte d'orientation et baisse de la fertilité dues à l'exposition à la deltaméthrine.

En conclusion, les risques encourus par les insectes utiles du fait de leur exposition aux médicaments vétérinaires et en synergie avec les pesticides utilisés en agriculture sont largement inconnus mais prévisiblement négatifs. Nous sommes sûrs que certaines des substances utilisées par les agriculteurs sont très toxiques pour les insectes tels que les abeilles et persistent dans l'environnement, ce qui représente un réel danger.

PLANTES GÉNÉTIQUEMENT MODIFIÉES À ACTION INSECTICIDE

Les plantes OGM (organismes génétiquement modifiés) ont été modifiées pour les rendre capables de produire des toxines. La capacité à produire des poisons est introduite sous forme de gènes, de sorte que la plante devient toxique par elle-même, ce qui réduit la nécessité de distribuer des insecticides. Comme pour les pesticides distribués avec des pulvérisateurs dans les champs, les insectes sont devenus résistants à ces toxines autoproduites par des plantes artificiellement modifiées (on les appelle des plantes transgéniques). Ces toxines, qui sont des protéines chimiques, peuvent être trouvées, bien qu'à des concentrations très faibles (<90 ng/mg) dans le pollen.¹⁰⁷

Le Bacillus thuringiensis est une bactérie qui vit naturellement dans le sol et qui est capable de produire diverses toxines protéiques pouvant être utilisées comme insecticides (par exemple contre les lépidoptères et les coléoptères).¹⁵⁹ Grâce à la biotechnologie, ces toxines peuvent être achetées et utilisées comme insecticides dans l'agriculture biologique.

Des gènes conférant la capacité de produire des toxines de *Bacillus thuringiensis* de manière indépendante ont été introduits artificiellement dans des plants de coton (*Gossypium hirsutum*), de maïs (*Zea mays*), de pomme de terre (*Solanum tuberosum*) et de tomate (*Lycopersicon esculentum*) : dès 2008, ces modifications génétiques ont été testées dans des expériences en plein champ sur 30 espèces végétales différentes.⁶⁰²

Les toxines de *Bacillus thuringiensis* présentes dans les plantes génétiquement modifiées (par exemple dans le pollen et le nectar) pourraient nuire aux abeilles et être ingérées par les humains par le biais du miel.¹⁰⁷ Ces bactéries vivent dans le sol et produisent des protéines (δ -endotoxines cristallines ou Cry) qui, dans les intestins de certains insectes, génèrent des molécules capables de les tuer. L'une de ces protéines a été utilisée pour combattre un papillon, la fausse teigne de l'abeille (*Galleria mellonella* ou grande teigne).^{107, 158} Ces protéines ont donc également été utilisées pour lutter contre un lépidoptère qui nuit aux apiculteurs.

Il faut obtenir davantage d'informations sur les changements éventuels de la composition du nectar et du pollen résultant de la modification génétique ou, en tout cas, générés par la sélection artificielle. Le nectar ne contient pas ou très peu de protéines, contrairement au pollen. Il pourrait être utile d'avoir plus d'informations sur les changements dans la qualité et la quantité de pollen et de nectar, et sur les changements dans la composition des substances volatiles attractives pour les insectes pollinisateurs.

En raison de la diffusion de plantes génétiquement modifiées pour être résistantes à la phytotoxicité des herbicides, la quantité distribuée en agriculture qui peut générer des effets négatifs augmente. Il serait intéressant d'avoir plus d'informations sur le transfert probable des gènes de résistance aux herbicides ou d'autres gènes de modification aux micro-organismes (bactéries et levures) dans l'intestin des abeilles. Un sujet particulièrement intéressant dans le domaine de la santé publique est celui de la résistance aux antibiotiques des bactéries intestinales des abeilles (et autres). Il existe peu d'informations sur ces sujets. Il s'agit de domaines de recherche très intéressants qui pourraient démontrer l'existence de risques jusqu'ici sous-estimés ou inconnus.

EXPOSITIONS MULTIPLES INÉVITABLES

Les abeilles peuvent entrer en contact avec des pesticides utilisés par les apiculteurs (par exemple, l'acarien *Varroa*) ou des pesticides distribués par les agriculteurs, les éleveurs et dans les environnements urbains (par exemple, pour lutter contre les mauvaises herbes). En supposant qu'à chaque vol, une abeille peut entrer en contact avec une surface végétale de 5 cm², et que chaque abeille effectue 5 vols par jour, les butineuses entreront en contact avec une surface de 25 cm² par jour. En multipliant cette surface par le nombre d'abeilles butineuses en vol, qui peut être égal à un tiers de l'ensemble des abeilles ouvrières présentes, on obtient une estimation de la surface végétale avec laquelle elles pourraient entrer en contact : plus de 33 m² par jour ; l'exposition passive aux polluants (ex : produits distribués sur les feuilles des plantes) peut donc être considérable.¹³ Si l'on considère que les abeilles se déplacent facilement dans un rayon d'au moins 1,5 km autour de la ruche, cela signifie qu'elles pourront visiter une zone de plusieurs kilomètres carrés (en réalité, elles peuvent se déplacer de plus de 10 km, dans une zone de 100 km²).¹⁸⁴ La superficie d'une exploitation agricole moyenne en Europe est d'environ 0,16 km², de sorte que les abeilles peuvent être exposées simultanément aux pesticides utilisés dans des centaines d'exploitations et de cultures différentes.³² En outre, les apiculteurs sont contraints au nomadisme en raison de la monoculture intensive. Les abeilles sont donc inévitablement exposées à des mélanges complexes et imprévisibles.

Les produits apicoles peuvent contenir divers polluants à différentes concentrations, qui peuvent être échangés par diffusion au sein de la ruche. Les pesticides liposolubles (tels que le bromoprylate, le coumaphos, le t-fluvalinate) s'accumulent dans la cire, où ils peuvent être retrouvés après des années, tandis que les molécules hydrosolubles se retrouvent dans le miel (acide formique, acide oxalique et cymiazole) et peuvent également altérer le goût. Les larves restent 21 jours dans les cellules, ce qui leur permet d'absorber passivement les substances dangereuses présentes dans la cire : le coumaphos (acaricide utilisé par les apiculteurs) peut passer de la cire au miel en moins de 30 jours.¹³

Il existe de nombreuses preuves d'une exposition chronique à des mélanges composés de nombreuses substances différentes, et pas seulement de pesticides :

- Plus de 150 pesticides différents ont été trouvés dans des échantillons provenant de ruchers du monde entier.⁴¹
- Un autre travail scientifique montre que 161 pesticides ont été trouvés dans les ruches du monde entier, dont 124 dans le pollen, 95 dans la cire et 77 dans le miel ou le nectar ; les plus fréquents sont les insecticides (83 ingrédients actifs), suivis des fongicides (40 ingrédients actifs), des herbicides (27 ingrédients actifs) et des acaricides (10 ingrédients actifs).⁴⁵
- Plus de 120 molécules de pesticides différentes peuvent être trouvées dans les produits de la ruche : une moyenne de 6 molécules par échantillon.⁶⁰²
- Dans les échantillons de pollen, on peut trouver 46 pesticides différents sur les 171 trouvés dans 108 échantillons (aux États-Unis en 2007).⁶⁰³ Les pesticides les plus fréquemment retrouvés sont (par ordre décroissant) : les insecticides, les fongicides et les herbicides. Les molécules les plus fréquemment trouvées étaient : le fluvalinate (dans plus de 70 échantillons de pollen), le coumaphos, le chlorpyrifos, l'endosulfan et l'atrazine (dans plus de 20 échantillons).⁶⁰³ Dans le pollen, on trouve des insecticides et des fongicides. Dans la cire de fluvalinate, le coumaphos et le chlorpyrifos sont les molécules les plus fréquemment retrouvées : les deux premiers dans 100% des échantillons. Ces données confirment le caractère systématique et sérieux de la contamination d'importantes matrices d'abeilles.

- Une autre étude détermine 17 molécules de différents pesticides dans le même échantillon de pollen.⁶⁰³

- Dans les 887 échantillons de pollen, de cire et d'abeilles examinés en Amérique du Nord, on trouve en moyenne 6,5 molécules de pesticides différentes par échantillon : au total, 121 pesticides différents sont trouvés (sur les 200 recherchés).⁵⁹⁷

- 90% du service commercial de pollinisation en agriculture est assuré par les abeilles domestiques, qui souffrent d'une augmentation alarmante de leur mortalité. En Amérique du Nord, on trouve des pesticides dans les produits apicoles à des concentrations élevées et jusqu'à 39 résidus simultanément, avec une moyenne de 8 ingrédients actifs par échantillon de cire.¹²⁰³ Parmi les molécules les plus fréquemment retrouvées dans la cire figurent le fluvalinate, le coumaphos, le coumaphos oxon (un métabolite du coumaphos) et le chlorpyrifos. Les trois premiers résidus sont le résultat des mesures prises par les apiculteurs pour lutter contre l'acarien parasite *Varroa destructor*. Les abeilles sont exposées à des mélanges complexes très dangereux puisque 87 ingrédients actifs peuvent être trouvés dans la cire (sur 121 recherchés) et 98 dans le pollen (avec une moyenne de 7 ingrédients actifs par échantillon et jusqu'à 31 molécules simultanément dans le pollen).

En Italie, 130 molécules pesticides, commercialisées dans au moins 1.280 produits, sont les plus fréquemment utilisées (en réalité, plus de 400 molécules de principes actifs sont autorisées, qui sont commercialisées dans des mélanges avec des centaines de substances différentes sur lesquelles peu d'informations sont disponibles).³² La situation se complique si l'on considère des dérivés tels que la métabolite des substances actives et des substances utilisées dans le mélange commercial (par exemple, les adjuvants qui ont différentes fonctions telles que faciliter la dispersion des substances actives). Il existe au moins 15 métabolites qui ont certainement été signalés comme ayant des effets indésirables, notamment le sulfoxyde d'aldicarbe, le sulfate d'endosulfan, le sulfone de fipronil, le 5-hydroxy-imidacloprid, le DDE et l'ométhoate.⁴⁵

Les effets synergiques de ces mélanges sont dans la plupart des cas inconnus, mais les quelques informations disponibles suggèrent qu'il existe également des effets néfastes sur les organismes non ciblés tels que les pollinisateurs sauvages. La plupart de ces molécules se trouvent à des concentrations inférieures à la dose qui peut tuer 50% des abeilles adultes, mais il ne faut pas oublier que le pollen est la principale nourriture des jeunes et que les effets sublétaux et synergiques peuvent être aussi dévastateurs, voire plus, que ceux mesurés en quelques heures. L'exposition à des mélanges complexes et dangereux durera toute une vie. Cet état de risque devrait conduire à une révision de la réglementation sur l'utilisation des molécules dangereuses, car les effets sont difficiles à mesurer en laboratoire.

Malheureusement, les pollinisateurs sauvages sont en déclin et l'une des principales causes est l'utilisation des pesticides tels que les insecticides. Parmi les molécules les plus dangereuses et en même temps les plus utilisées de la planète figurent les insecticides néonicotinoïdes, autorisés sur plus de 140 cultures dans le monde. Ils sont persistants et solubles dans l'eau et peuvent donc s'éloigner facilement du site où ils sont utilisés. Les insectes peuvent effectuer de longues migrations (par exemple, le papillon monarque, *Danaus plexippus*) et être exposés à des dizaines de molécules différentes. D'autres, comme certaines abeilles solitaires, sont peu susceptibles de se déplacer sur plus d'un kilomètre.

En Amérique du Nord (Missouri), des recherches ont été menées en 2016 et 2017 pour évaluer la contamination des abeilles sauvages, des papillons et des reines de bourdons.¹²²⁵ Les insectes vivants ont été collectés dans des zones caractérisées par une partie de la surface à l'état naturel à proximité de champs cultivés. Il s'agit donc d'habitats présentant un haut niveau de diversification. Les cultures prédominantes sont le maïs (*Zea mays*) et le soja (*Glycine*), dont les

graines sont enrobées de néonicotinoïdes tels que l'imidaclopride et la clothianidine. En 2016, 101 abeilles sauvages (dont 16 reines bourdons), 7 chenilles, 62 papillons et papillons de nuit ont été collectés sur quatre zones, en 2017 467 abeilles sauvages (dont 16 reines bourdons appartenant à 5 espèces différentes) ont été collectées sur les 4 mêmes sites qu'en 2016 et sur une autre zone. Les plus gros insectes, comme les bourdons, peuvent être analysés individuellement, tandis que plusieurs individus (de la même espèce et du même site) sont utilisés pour les plus petits. Un total de 90 échantillons d'insectes sauvages a été obtenu dans lesquels 168 pesticides et produits de dégradation ont été recherchés.¹²²⁵ Avant d'être utilisés pour l'analyse, les insectes ont été débarrassés du pollen présent sur leur corps. Dans les 43 échantillons d'abeilles sauvages, 9 pesticides ont été détectés : le métolachlore (dans 19% des 43 échantillons), la flumétraline (16%), l'atrazine (14%), le tébuconazole (12%), le tébupirimfos (9,3%), la bifenthrine (5%), le fludioxonil (5%), l'oxadiazon (2%) et l'imidaclopride (2%) ; des herbicides (dans 23% des échantillons), des fongicides (16%) et des insecticides (14%). Parmi les échantillons d'abeilles, 79% ont enregistré une matière active, 16% deux et 5% trois : le tébuconazole a été trouvé dans 100% des échantillons et l'atrazine dans 80%. De nombreuses abeilles sauvages capturées dans le cadre de cette étude construisent leurs nids dans le sol et peuvent donc être facilement contaminées par les ingrédients actifs présents dans le sol. En fait, 75% des abeilles qui enregistrent le tébupirimfos construisent leurs nids dans le sol (par exemple, *Melissodes*).¹²²⁵ Sur les 23 échantillons de papillons, 44% ne contiennent pas de pesticides, mais dans les autres, 8 pesticides sont enregistrés : 35% contiennent des herbicides, 30% des insecticides et 17% des fongicides. Les molécules retrouvées dans les échantillons de papillons positifs étaient : le métolachlore (26%), la bifenthrine (22%), le p,p'-DD (22%), l'imidaclopride desnitro (17%), l'atrazine (17%), le tébuconazole (13%), l'azoxystrobine (4%) et le p,p'-DDT (4%). 74% des 24 échantillons de bourdons royaux ont enregistré la présence d'au moins un pesticide : 25% contenaient 3 ingrédients actifs. Les molécules enregistrées sont : le tébuconazole (46%), l'imidaclopride desnitro (33%), le métolachlore (33%), l'atrazine (25%), le flutriafol (13%), le cyproconazole (8%), le fludioxonil (8%), l'oxadiazon (4%) et la bifenthrine (4%).¹²²⁵

Les résultats de cette recherche confirment que les pollinisateurs sauvages sont exposés à des mélanges de substances toxiques, dont certaines sont beaucoup plus toxiques que d'autres, comme l'insecticide organophosphoré bifenthrine, le produit de dégradation organochloré p,p'-DDT et l'imidaclopride. L'imidaclopride est détecté à une concentration maximale de 22,5 ng/g (chez l'abeille *Melissodes*), tandis que la bifenthrine est détectée à une concentration maximale de 32,8 ng/g. Ces concentrations sont supérieures aux concentrations susceptibles de provoquer des effets néfastes.

INTRODUCTION AUX EFFETS SYNERGIQUES

Un problème majeur est l'exposition simultanée à des centaines de molécules et à leurs dérivés tels que les métabolites.³⁷⁵ Des substances autres que la substance active contenue dans la formulation commerciale peuvent également générer des effets dangereux et largement inconnus (par exemple, les tensioactifs, les agents stabilisants, les dispersants, les adjuvants).⁷¹⁷ Les tensioactifs peuvent être ajoutés aux mélanges avec lesquels les pesticides sont commercialisés. Les tensioactifs sont capables de détruire la couche externe du corps de l'insecte (la cuticule qui forme l'exosquelette). Dans la plupart des cas, nous ne savons pas quel type d'interactions peut résulter d'une exposition à vie à des mélanges de composés très hétérogènes et variables.

Les effets synergiques ne sont rien d'autre que des conséquences négatives plus importantes que celles qui seraient causées par la somme des effets enregistrés pour les molécules individuelles : l'effet négatif du mélange est beaucoup plus important que la somme.

Il est difficile et coûteux de tenter d'évaluer la toxicité synergique générée par la présence simultanée de 2 ou 6 molécules ou plus : en Angleterre, en 2015, une moyenne de trois matières actives (2,6) par hectare a été distribuée à chaque distribution unique (aérosol généré avec le pulvérisateur).⁴⁷⁴ Il est irréaliste de penser comparer les effets des combinaisons dérivées des milliers de molécules de pesticides, ainsi que de leurs additifs et adjuvants, auxquels les êtres vivants, y compris les abeilles et les humains, peuvent être exposés.

L'évaluation toxicologique d'une seule toxine ne représente pas la réalité, car on est exposé à des centaines de molécules différentes en même temps. Les études préliminaires, principalement gérées par les entreprises de pesticides, évaluent la toxicité aiguë d'une substance (pure) à la fois. Dans la ruche, on trouve 121 pesticides différents, dont certains sont utilisés par les apiculteurs.⁴⁷³ Si on voulait essayer des tests de laboratoire pour mesurer les effets synergiques de 121 ingrédients actifs, en les évaluant deux par deux, il faudrait essayer plusieurs milliers de combinaisons différentes ; c'est un investissement considérable en temps et en ressources. Toutefois, cette évaluation serait encore incomplète, car le nombre de substances avec lesquelles les insectes entrent en contact en même temps est supérieur à deux, et il y en a beaucoup plus que 121.

Certaines recherches ont essayé des combinaisons binaires et mesuré plusieurs effets synergiques. L'imidaclopride est l'un des insecticides les plus utilisés dans le monde : le soja et le coton sont probablement les cultures dans lesquelles il est le plus utilisé ; pas moins de 17 applications de pesticides par an sont effectuées dans ces cultures. Il a été démontré qu'il existe des effets synergiques et donc une augmentation de la mortalité des abeilles suite à une exposition à l'imidaclopride et à l'une des matières actives suivantes : tétraconazole, sulfoxaflor, oxamyl (chez *Apis mellifera*).⁶⁷⁵ On observe une augmentation de la mortalité supérieure à la somme des mortalités générées par l'exposition aux différents principes actifs aux mêmes doses. La coexistence de l'imidaclopride et d'une des trois molécules précitées entraîne une augmentation de la mortalité, mesurée sur 48 heures, comprise entre 15 et 26%.

L'administration simultanée de 8 pesticides (imidaclopride (insecticide), tétraconazole (fongicide), sulfoxaflor (insecticide), oxamyl (insecticide carbamate), acéphate (insecticide organophosphate), glyphosate (herbicide), clothianidine (insecticide), λ -cyhalothrine (pyréthroïde)) tue toutes les abeilles exposées dans les 48 heures : chaque ingrédient actif est utilisé à une concentration équivalente à la dose létale pour 20% des individus exposés (DL₂₀).⁶⁷⁵

L'inhibition du système de détoxification (cytochrome P450 inhibé avec le butoxyde de pipéronyle) augmente de 5,2 fois la toxicité de l'imidaclopride : le tétraconazole a cet effet. Le butoxyde de pipéronyle est utilisé comme synergiste en association avec des insecticides tels que les pyréthrines.^{230, 236, 675} La présence simultanée de ces molécules renforce également les effets des pyréthroïdes.

Des effets synergiques peuvent se produire en raison de l'altération de fonctions physiologiques de base : certains fongicides (thiophanate-méthyl) et insecticides (imidaclopride néonicotinoïde) diminuent la capacité des abeilles à produire de l'énergie.²³⁷ Un autre mécanisme synergique est dû à des molécules qui modifient les mécanismes de transport des pesticides dans le corps de l'insecte.⁴⁷³

Les synergies entre des centaines de combinaisons de pesticides sont largement inconnues mais certainement négatives. L'ordre chronologique d'exposition peut avoir des effets différents : l'exposition à des doses sublétales d'abord au tau-fluvalinate ou au coumaphos puis à l'amitraz n'entraîne pas (dans les études de laboratoire) une augmentation de la toxicité de l'amitraz. Au contraire, si les abeilles sont exposées d'abord à l'amitraz puis au tau-fluvalinate ou

au coumaphos, la toxicité de l'amitraz augmente.¹²⁰³ Ainsi, la séquence temporelle peut également influencer, de différentes manières, les effets indésirables à très faible dose.

Pour la plupart des molécules toxiques telles que les pesticides, les sites métaboliques où les effets synergiques sont générés restent à découvrir et la situation est aggravée par le fait que de nouvelles molécules et stratégies d'utilisation sont constamment produites. À cet égard, il est possible de souligner que peu d'informations sont disponibles sur l'utilisation de nanoparticules (elles peuvent avoir la taille de micro-organismes) utilisées pour faciliter la dispersion et la persistance des ingrédients actifs.

Des effets synergiques peuvent également se produire entre les xénobiotiques et les substances naturellement présentes dans les fleurs. Les plantes peuvent produire des attractifs pour les abeilles comme la quercétine ou des répulsifs comme la quinine, un alcaloïde produit par les plantes du genre *Cinchona*, ou la caféine produite par les plantes du genre *Rutaceae* et *Rubiaceae* (la caféine peut améliorer la mémoire des abeilles).⁷¹⁸ La quercétine stimule la germination du pollen chez de nombreuses plantes. Cette molécule se trouve dans le miel, le pollen et la propolis, et il a été constaté que chez les abeilles, elle favorise l'activation de 12 gènes, qui augmentent la production de systèmes de défense protéiques tels que le cytochrome P450. Ainsi, des substances naturelles telles que la quercétine peuvent augmenter la capacité à métaboliser et à inactiver certains pesticides.⁷¹⁸ Une carence dans l'apport de ces substances, telle que celle générée par l'utilisation d'herbicides, peut facilement avoir des effets négatifs en réduisant le nombre et la diversité des fleurs.

Les herbicides et les fongicides sont des molécules qui ne sont pas utilisées pour tuer les insectes, et la toxicité aiguë mesurée pour les abeilles en laboratoire est généralement faible.¹⁰⁷ C'est également pour ces raisons que les herbicides et les fongicides ne font l'objet d'aucune restriction (par exemple sur l'étiquetage) pour réduire l'exposition des abeilles. Cela signifie que les insectes peuvent être exposés à des concentrations élevées pendant la floraison. Pour certains herbicides, un effet important de réduction de l'espérance de vie et d'augmentation de la mortalité des colonies exposées a été démontré (par exemple, le paraquat, un herbicide interdit en Europe où il est produit).^{107, 160}

Certains facteurs, qui peuvent renforcer les effets négatifs des pesticides et qui sont difficiles à évaluer de manière préventive, sont énumérés ci-dessous.

- La variation de la toxicité dans différentes conditions environnementales telles que l'humidité, le vent, la pluie et la température. Les conditions environnementales influencent également la persistance et la dispersion.
- La méthode de distribution peut influencer considérablement l'efficacité :
 - o La même quantité de substance active peut être distribuée différemment et dans des dilutions différentes (par exemple dans 100 L d'eau ou dans quelques litres de solvant), ce qui entraîne des conséquences différentes.
 - o Le système d'atomisation peut générer des gouttelettes d'une taille jusqu'à 100 fois supérieure. Dans certains cas, les pesticides sont distribués dans des microparticules (par exemple en plastique).
- La susceptibilité génétique différente des abeilles ou les différents stades : les larves et les adultes subissent des effets différents après une exposition aux mêmes doses.
- La propagation d'agents pathogènes : par exemple, le pollen peut être porteur de certains virus et du champignon *Nosema* et, pour cette raison également, il peut être remplacé dans les tests de laboratoire par des sources de protéines alimentaires (par exemple, des extraits de levure).
- La résistance des insectes aux perturbations est influencée par de nombreux facteurs tels que la malnutrition (par exemple la carence en pollen), la présence de parasites tels que le champignon *Nosema*, l'inhibition des défenses immunitaires ou des systèmes de détoxification.

- La densité des ruchers dans la région peut favoriser la propagation des maladies et éroder la diversité génétique locale.
- La présence simultanée de plusieurs ingrédients actifs, comme l'amitraz et les pyréthroïdes, peut entraîner des effets additifs et synergiques.¹⁰⁷ Des effets synergiques ont été signalés entre les insecticides à base de tau-fluvalinate et les organo-phosphorés tels que le coumaphos, entre les néonicotinoïdes et les fongicides, et entre les néonicotinoïdes et les pyréthroïdes.⁴⁷⁴ On sait qu'il existe une synergie entre les fongicides, qui sont généralement considérés comme peu toxiques pour les abeilles, et les insecticides néonicotinoïdes et pyréthroïdes. À cet égard, il est utile de rappeler un chiffre qui a déjà été souligné : en Italie, en moyenne en 2014, plus de 5 kg de matières actives ont été utilisées par hectare (en Espagne plus de 3 kg/ha, en France et en Allemagne plus de 2,5 kg/ha).²¹³ Dans certaines cultures, comme les vignobles et les vergers de pommiers, le nombre de traitements et les quantités peuvent être beaucoup plus élevés : dans la province autonome de Trente, le nombre de traitements dépasse 50 kg/ha par an, dans la province autonome de Bolzano 43 kg/ha par an, dans le Val d'Aoste 22 kg/ha par an et en Vénétie 14 kg/ha par an.⁵⁰⁰ Dans les vergers de pommiers, des pics de 90 kg/ha par an peuvent être enregistrés.⁵³²

On dispose de peu d'informations sur les effets synergiques, mais certaines études confirment que de très faibles doses, considérées comme non dangereuses, peuvent en fait avoir des conséquences négatives. Les abeilles qui survivent à l'hiver vivent plus longtemps et sont donc potentiellement plus endommagées par de faibles concentrations de mélanges complexes. Une étude a examiné les effets synergiques de trois molécules : l'insecticide imidacloprid, le fongicide difenoconazole et l'herbicide glyphosate. Les abeilles ont été artificiellement exposées, en les nourrissant, à des concentrations mesurables dans le pollen et le nectar des trois molécules, soit individuellement, soit en combinaison.¹²¹⁶ Les abeilles ont été nourries artificiellement pendant 20 jours avec ces trois pesticides individuellement, en combinaison binaire ou les trois ensemble, à des concentrations de 0,1, 1 ou 10 µg/L chacun. L'étude démontre l'existence d'effets synergiques car la mortalité résultant de la combinaison de plusieurs pesticides est supérieure à celle générée par les molécules individuelles. Les herbicides et les fongicides sont considérés comme présentant un faible risque, mais l'exposition chronique pendant 20 jours à de très faibles doses de combinaisons de ces molécules génère une augmentation de la mortalité de plus de 50%. Les processus de détoxification sont altérés, le système nerveux est endommagé, les mécanismes de défense contre le stress oxydatif, le métabolisme et l'immunité sont perturbés.¹²¹⁶ Ainsi, les effets synergiques à des doses considérées comme sûres par les tests de toxicité aiguë, après une exposition chronique à des concentrations plus faibles, sont également létaux.

Les effets synergiques peuvent augmenter la toxicité jusqu'à 100 ou 1.000 fois. Les études préliminaires réalisées dans des conditions de laboratoire peuvent donc fournir des informations qui sont probablement une sous-estimation considérable. En conclusion, les *tests de toxicité* ont cette autre limite : ils ne mesurent pas les effets synergiques, c'est-à-dire ceux dus à une exposition simultanée à différentes molécules. L'exposition multiple peut générer des effets négatifs plus importants que ceux attendus de la simple somme, et peut également en générer de nouveaux et plus dangereux. Les pesticides appartenant à des catégories considérées comme peu dangereuses pour les abeilles, comme certains fongicides et herbicides, en présence de molécules telles que les insecticides et les acaricides, peuvent générer des effets négatifs non négligeables. Ces effets peuvent être aussi dangereux et dévastateurs que les effets aigus mesurés par les fabricants avant la commercialisation.

CERTAINS EFFETS SYNERGIQUES

La littérature scientifique a rassemblé des preuves de l'existence d'effets synergiques suffisants pour déclencher le principe de précaution, c'est-à-dire un comportement d'autoprotection. Certains d'entre eux sont résumés dans les pages suivantes.

Synergies entre fongicides et insecticides : inhibition des systèmes de protection antipoison

De nombreuses substances agissent comme des inhibiteurs des trois principaux systèmes de détoxification que possèdent les abeilles, de sorte que les dommages peuvent être renforcés en altérant les systèmes de défense. Il convient de remarquer que les abeilles ont des systèmes de détoxification qui sont, dans certains cas, moins efficaces que ceux d'autres insectes (par exemple, *Drosophila melanogaster*, la mouche des fruits, et *Anopheles gambiae*, le moustique qui peut transmettre la malaria). Les trois principaux systèmes de détoxification des abeilles sont les suivants :⁶⁰¹

- L'enzyme *glutathion-S-transférase*.
- Le complexe protéique appelé *cytochrome P450 mono-oxygénase*. Ce système effectue diverses réactions telles que des oxydations ou des déméthylations, et est responsable de la transformation du néonicotinoïde thiaméthoxam en clothianidine. Il est également capable d'effectuer la détoxification des insecticides organochlorés et des pyréthroides.
- L'enzyme *carboxyl cholinestérase*.

L'inhibition de ces systèmes augmente la toxicité de nombreux pesticides (par exemple, le tau-fluvalinate et le coumaphos).¹⁰⁷ En présence d'inhibiteurs du complexe protéique de la *monoxygénase du cytochrome P450*, le tau-fluvalinate ou la lambda-cyhalothrine deviennent plus toxiques, car la dose capable de tuer 50% des insectes (DL₅₀) diminue.

La clothianidine et le diméthoate agissent comme des antagonistes sur *Apis mellifera*, *Bombus terrestris* et *Osmia bicornis*, car ils sont probablement en compétition pour les mêmes enzymes.⁴⁷⁴ Ces deux pesticides interagissent avec le complexe enzymatique du *cytochrome P450* : le diméthoate est activé, ce qui accroît sa toxicité, tandis que la clothianidine est métabolisée, ce qui la rend moins toxique. Il est facile de prévoir des effets synergiques entre des molécules comme certains fongicides capables d'inhiber le complexe enzymatique *mono-oxygénase du cytochrome P450*, et des insecticides qui devraient être détoxifiés par ce système. Par conséquent, les concentrations qui tueront 50% des abeilles exposées seront, dans des conditions réelles, beaucoup plus faibles que celles calculées en laboratoire : en présence de prochloraz, la DL₅₀ est réduite jusqu'à des dizaines de fois pour l'alpha-cyperméthrine, la deltaméthrine ou le fluvalinate.⁶⁰¹

De nombreuses études enregistrent des effets synergiques entre acaricides et fongicides, c'est-à-dire entre les molécules utilisées par les apiculteurs et celles utilisées par les agriculteurs (elles peuvent être contenues dans le pollen ; les fongicides, comme le myclobutanil, peuvent se retrouver dans le pollen à une concentration de 1 ppm).

- Des effets synergiques entre la deltaméthrine (insecticide) et le prochloraz (fongicide) ont été enregistrés dans les années 1980.²⁴³ En présence du fongicide, qui n'est pas considéré comme dangereux pour les abeilles, on obtient le même effet nocif qu'avec l'insecticide, mais à une concentration 50 fois inférieure.⁸⁵⁹
- Une étude a révélé que 14% des 60 échantillons de cire analysés contenaient au moins 2 des 120 pesticides recherchés, et 5% en contenaient 3 à 4. Dans certains échantillons de cire, on peut trouver simultanément des insecticides (diazinon, fenpyroximate ou les métabolites de l'amitraz) et des fongicides (difenoconazole, fenbuconazole ou azoxystrobine) à des concentrations moyennes de 6,4 µg/kg pour les insecticides et 10,1 µg/kg pour les fongicides respectivement.⁶⁷ Le fongicide tébuconazole inhibe le système

enzymatique de détoxification (*cytochrome P450*), ce qui renforce les effets indésirables des insecticides.

- Les fongicides (triazoles) peuvent générer des effets synergiques avec les insecticides pyréthroïdes.^{33, 39} En présence du fongicide propiconazole, la toxicité des pyréthroïdes est multipliée au moins par 16, celle du thiaclopride par 560 et celle de l'acétamipride par 100.⁴⁵
- Des effets synergiques ont été démontrés par la présence simultanée de tau-fluvalinate (un pyréthroïde utilisé contre l'acarien *Varroa destructor*) et de fongicides : le prochloraz multiplie par 100 la toxicité du pyréthroïde tau-fluvalinate, probablement en raison de l'inhibition du système de détoxification (*cytochrome P450*).⁴⁷⁴
- Certains fongicides utilisés sur les amandes (boscalid et pyraclostrobine) altèrent les mécanismes de transport utiles à la détoxification chez les abeilles, augmentant d'au moins 3 fois la toxicité du pyréthroïde tau-fluvalinate (le tau-fluvalinate est utilisé contre l'acarien *Varroa destructor*).⁴⁷³
- Sur les abeilles adultes, les néonicotinoïdes et les fongicides azolés ont des effets synergiques en ce sens qu'ils génèrent une toxicité multipliée par 200 à 1.000 ; par exemple, le triflumizole augmente la toxicité de l'acétamipride et du thiaclopride.³⁵
- Un effet synergique entre le fongicide propiconazole et l'insecticide néonicotinoïde thiamethoxam a été démontré, avec une augmentation d'au moins 8,3 fois de la toxicité pour les abeilles.⁶⁷ La toxicité pour les abeilles de l'insecticide néonicotinoïde thiaclopride augmente de trois ordres de grandeur en présence de triflumizole.⁶⁰⁰ Le tébuconazole peut augmenter la toxicité des néonicotinoïdes, tels que le thiaclopride, par inhibition du complexe enzymatique de détoxification (*cytochrome P450 monoxygénase*).^{184, 601}

La toxicité (DL₅₀ par contact) de l'acétamipride (néonicotinoïde) est multipliée par 6 en présence simultanée de butoxyde, par 105 avec le propiconazole ou par 244 avec le triflumizole.⁶⁰⁰ La toxicité (DL₅₀ par contact) du thiaclopride est multipliée par 154, 559 et 1.141 en présence des mêmes molécules (butoxyde, propiconazole ou triflumizole).⁶⁰⁰

- Les fongicides peuvent multiplier par plus de 100 la toxicité des acaricides.^{243, 601} Le fongicide chlortalonil aurait des effets synergiques avec l'acaricide pyréthroïde tau-fluvalinate utilisé par les apiculteurs pour lutter contre l'acarien *Varroa*.⁷¹⁸
- La toxicité de l'acaricide tau-fluvalinate (pyréthroïde) est accrue si un fongicide tel que le prochloraz est présent en même temps. Le prochloraz augmente également la toxicité du coumaphos et du fenpyroximate (acaricides).⁷⁰⁶ Comme déjà mentionné, cet effet peut s'expliquer par l'inhibition par le fongicide du système de détoxification (*cytochrome P450*), qui est capable d'inactiver les acaricides utilisés par les apiculteurs. L'amitraz augmente également la toxicité de trois autres acaricides dont la détoxification est assurée par le *cytochrome P450* (celle du tau-fluvalinate est multipliée par 5). Ces acaricides sont parmi les molécules les plus utilisées pour lutter contre les dégâts causés par l'acarien parasite *Varroa destructor*. L'acarien suce l'hémolymphe des abeilles, peut être porteur de virus et génère une immunosuppression, nuisant principalement à la population mâle de la colonie. En raison de l'utilisation répandue de certains de ces pesticides, des acariens (*Varroa*) résistants au tau-fluvalinate et au coumaphos ont été enregistrés. Ces deux principes actifs sont lipophiles et s'accumulent dans la cire, ce qui peut provoquer des effets synergiques pendant des années. Dans cette étude, le niveau de toxicité enregistré était, par ordre décroissant, le suivant : amitraz > phénopyroximate > tau-fluvalinate > coumaphos.⁷⁰⁶
- Certains fongicides, tels que le prochloraz, le triflumizole et le propiconazole (ce sont des inhibiteurs de l'ergostérol) réduisent l'activité du système de détoxification constitué par le complexe enzymatique du *cytochrome P450*.⁴⁸³ Cette inhibition augmente de

plusieurs centaines de fois la toxicité aiguë de molécules comme l'acétamipride et le thiaclopride, et de plusieurs fois celle du coumaphos, du tau-fluvalinate et du fenpyroximate. L'inhibition de l'activité des systèmes de détoxification renforce la toxicité de molécules telles que les organophosphorés (par exemple, l'acaricide coumaphos).⁴⁸³

- Dans les champs de maïs, l'exposition des abeilles aux fongicides augmente la toxicité aiguë des néonicotinoïdes.³⁸⁷ En particulier, le fongicide boscalid réduit de moitié la DL₅₀ de la clothianidine ou du thiamethoxam.
- Chez certains pollinisateurs, *Bombus terrestris* et *Osmia bicornis*, la présence de propiconazole (fongicide) multiplie par trois la toxicité de la clothianidine (insecticide néonicotinoïde).⁴⁷⁴

L'exposition simultanée aux fongicides utilisés par les agriculteurs et aux acaricides utilisés par les apiculteurs augmente la toxicité de ces derniers de manière non négligeable. Cela pourrait être une raison pour obliger les agriculteurs à informer les apiculteurs des traitements qu'ils ont l'intention d'effectuer. La meilleure solution est toujours une autre : concevoir un nouveau système de production alimentaire qui ne nécessite pas de pesticides.

Synergies entre les insecticides

- Des effets synergiques ont également été enregistrés par la présence simultanée d'acaricides tels que le coumaphos et le tau-fluvalinate : l'effet toxique du tau-fluvalinate est multiplié par 3 si la ruche a été préalablement traitée au coumaphos.^{67, 243} La présence simultanée de coumaphos et de tau-fluvalinate accentue certains effets négatifs sur la reine des abeilles.⁶⁸
- La présence simultanée d'organochlorés et de pyréthroïdes génère des effets toxiques plus importants (on les retrouve simultanément dans le miel).¹⁷⁸

Synergies entre pesticides, ravageurs et micro-organismes

- Il est connu que l'exposition aux pesticides peut augmenter la sensibilité des abeilles à certains parasites.¹⁰⁷ Le parasite intestinal *Nosema ceranea*, en combinaison avec les néonicotinoïdes (par exemple, le thiaclopride et l'imidaclopride) ou l'insecticide fipronil, génère des effets synergiques.^{235, 243, 386, 482} Il s'ensuit que la présence de néonicotinoïdes augmente la susceptibilité au parasite intestinal (un champignon) et accroît la mortalité.³⁶⁰ Ces études démontrent l'existence de phénomènes additifs et synergiques à des doses très faibles.
- La persistance de certaines molécules dans la ruche (par exemple dans la cire) peut favoriser une susceptibilité accrue aux infections telles que celles du champignon *Nosema*.^{32, 35, 706} La réduction des capacités de défense, par l'inhibition de systèmes tels que le *cytochrome P450*, favorisera les parasites tels que les acariens (*Varroa destructor*) ou les champignons (le parasite intestinal *Nosema ceranea*).
- La combinaison de l'exposition par contact aux néonicotinoïdes, tels que la clothianidine, avec la présence de l'acarien parasite *Varroa destructor* génère des effets synergiques complexes.³⁶⁷ La clothianidine seule et aux doses les plus faibles réduit le comportement de toilettage, qui élimine l'acarien ectoparasite du corps des abeilles. La clothianidine augmente l'occurrence des infections par le virus de la déformation des ailes. Seuls ou ensemble, ces deux facteurs modifient l'expression des gènes dans le cerveau.
- *Beauveria bassiana* est un champignon entomopathogène cosmopolite, qui est utilisé dans la lutte biologique car il est capable de causer des dommages à divers types d'insectes.²³⁸ Ce champignon provoque la maladie du ver à soie. Lorsque les spores du champignon entrent en contact avec un insecte sensible, elles germent et se développent à l'intérieur du corps, l'utilisant comme source de nourriture. Après la mort de l'insecte,

le mycélium se développe sur le cadavre, produisant de nouvelles spores. L'insecte parasité, mais pas encore mort, propage le champignon à d'autres spécimens. Ce champignon en combinaison avec les insecticides pyréthroïdes génère des effets synergiques.²³⁰

Certaines interactions entre les maladies et les pesticides ont été observées chez les abeilles, et les connaissances sur les autres pollinisateurs sont encore plus rares (par exemple, les abeilles solitaires, les papillons, les bourdons).

- Certains fongicides et herbicides peuvent inhiber la flore intestinale des abeilles, ce qui entraîne des conséquences négatives.^{32, 54}
- La présence simultanée de micro-organismes, utilisés pour leur capacité insecticide comme le *Bacillus thuringiensis* (utilisé en agriculture biologique), et de molécules comme les insecticides pyréthroïdes ou néonicotinoïdes génère des effets synergiques.²³⁰
- Les néonicotinoïdes, tels que la clothianidine ou l'imidaclopride, administrés aux abeilles (séparément par contact et à très faible dose) inhibent le système immunitaire et favorisent l'infection par les virus des ailes déformées.^{35, 395}
- Certains insecticides, à très faible concentration, favorisent la production d'une protéine inhibitrice du système immunitaire chez les abeilles. Le fait de nourrir les abeilles avec une solution sucrée contenant de la clothianidine ou de l'imidaclopride (à des concentrations comprises entre 0,1 et 10 ppb) favorise l'infection par le virus de la déformation des ailes. Les insectes ont été exposés à 21 ng d'imidaclopride ou de clothianidine par abeille, soit entre 1/10 et 1/1000ème de la dose létale par contact (tuant 50% des insectes en quelques heures). Ainsi, à très faible dose, la capacité de défense contre les virus est réduite.^{35, 395}
- La présence du virus de la paralysie chronique de l'abeille augmente la toxicité de la cyperméthrine.⁶⁰¹
- Les pyréthrinoïdes altèrent le métabolisme des lipides tels que ceux qui forment les barrières intestinales, facilitant le passage des virus de l'intestin à l'hémolymphe.⁶⁰¹

Autres synergies

- L'utilisation d'antibiotiques (utilisés contre la loque américaine) a entraîné une sensibilité accrue des abeilles aux acaricides fluvalinate et coumaphos.⁴⁷³
- Un régime pauvre en pollen accentue les effets négatifs (augmentation de la mortalité) rapportés suite à l'utilisation du fipronil.³⁵
- Les herbicides et les fongicides peuvent renforcer les effets toxiques des acaricides, tels que le fluvalinate et le coumaphos.⁵⁵
- Des molécules comme la fumagilline (utilisée par les apiculteurs américains contre le champignon *Nosema*, mais interdite en Europe) ou la quercétine (naturellement présente dans le pollen et le nectar de certaines plantes) peuvent multiplier la toxicité des néonicotinoïdes comme l'acétamipride (ces molécules agissent en inhibant les mécanismes de transport utiles à la détoxification).⁴⁷³

Des effets synergiques se produisent également dans d'autres organismes.

Chez les organismes aquatiques (comme les crustacés : *Daphnia magna*), la présence simultanée de fongicides et d'insecticides augmente la toxicité de ces derniers.⁵⁹⁸ En particulier, le fongicide prochloraz (qui inhibe la biosynthèse de l'ergostérol et est donc un perturbateur endocrinien) multiplie par 12 la toxicité de l'insecticide pyréthroïde alpha-cyperméthrine, tandis que le fongicide époxiconazole multiplie par 6 la toxicité de l'insecticide et que le propiconazole multiplie par 7 la toxicité de l'insecticide. Ces effets synergiques (dont la toxicité est multipliée

par 3 à 16) ont également été mis en évidence chez les abeilles (*Apis mellifera*).⁵⁹⁸ Les fongicides (époxyconazole et propiconazole) sont souvent distribués sur le terrain en mélange avec des insecticides pyréthroïdes (simultanément et ensemble pour lutter contre les champignons et les pucerons). Ces informations confirment l'existence de mécanismes synergiques inquiétants entre les fongicides et les insecticides, même chez les organismes non ciblés comme les organismes aquatiques. L'alarme est soutenue par le fait que les contrôleurs de l'eau trouvent plusieurs molécules de pesticides simultanément. Des effets synergiques peuvent être engendrés par des doses sublétales de pesticides, mais aussi par l'action simultanée de pesticides et d'organismes nuisibles. Il existe de nombreux autres polluants que nous distribuons dans l'environnement, sur lesquels nous avons peu d'informations et les interactions entre les combinaisons de facteurs sont largement inconnues.

L'enregistrement d'une mortalité accrue des abeilles, ainsi que la réduction de la biodiversité et les résultats de la surveillance environnementale (par exemple, la présence de polluants dans l'eau), confirment la présence de risques sous-estimés.

L'ÉVALUATION DES RISQUES N'EST PAS SIMPLE

Il existe une corrélation étroite, et évidente, entre le nombre de pesticides trouvés dans la cire ou le pollen et la santé de la colonie d'abeilles. Il existe une relation entre les molécules auxquelles les abeilles sont exposées tout au long de leur vie et leur santé. Une façon d'estimer le niveau de risque auquel les abeilles sont exposées à cause des pesticides est de calculer la somme des risques de chaque pesticide. En additionnant les quantités mesurées de chaque pesticide (par exemple dans le pollen ou la cire en µg/kg) et en divisant le résultat par les doses capables de tuer 50% des abeilles par ingestion (en µg/abeille, déterminées sur 24 ou 72 heures), on obtient une estimation du niveau de risque. Ce modèle suppose qu'il n'y a que des effets additifs et non multiplicatifs, et n'est pas en mesure de pondérer les effets à long terme et les métabolites.

Des recherches menées aux États-Unis ont permis de découvrir 93 pesticides différents dans les colonies d'abeilles : 13 ingrédients actifs dans les abeilles, 61 dans la nourriture des larves (un mélange de miel, de pollen et de sécrétions des abeilles ouvrières) et 70 dans la cire.⁷¹⁹ On trouve jusqu'à 4 substances actives en même temps dans les abeilles et seulement 15% des échantillons d'abeilles étaient exempts de pesticides (5/33). Les acaricides utilisés par les apiculteurs ont été retrouvés dans la plupart des échantillons d'abeilles (coumaphos et tau-fluvalinate). L'application de la méthodologie d'analyse de la somme des risques des pesticides dans les abeilles a montré que le pesticide le plus dangereux est le fipronil (on le trouve à des concentrations allant jusqu'à 9,9 ppb). Tous les échantillons d'aliments préparés par les abeilles pour les larves contiennent au moins un pesticide et les insecticides sont la catégorie qui contribue le plus à la somme des risques. Des molécules considérées comme moins dangereuses sont trouvées à des concentrations élevées : le fongicide chlortalonil est trouvé jusqu'à 26.000 ppb et l'acaricide coumaphos jusqu'à 3.260 ppb. Il apparaît que les abeilles sont déjà exposées à de nombreux ingrédients actifs différents à des concentrations élevées dans leur jeune âge. Jusqu'à 39 principes actifs ont été mesurés dans un seul échantillon de cire, avec une moyenne de 10 molécules par échantillon et aucun échantillon ne contenant moins de 3 principes actifs. Les insecticides néonicotinoïdes ont également été mesurés dans la cire. Dans cette matrice, le calcul de la contribution à la somme des risques place les acaricides en première position, suivis des insecticides.⁷¹⁹ Toutes les colonies examinées sont donc exposées simultanément à des dizaines de molécules différentes par contact et par ingestion. Les apiculteurs pratiquaient le nomadisme, les colonies étaient donc déplacées entre les champs d'agrumes, de pommes, de myrtilles, de concombres et de citrouilles. Les colonies qui étaient également déplacées pour

assurer un service de pollinisation étaient plus contaminées que celles utilisées exclusivement pour produire du miel. En raison des taux de mortalité élevés, les apiculteurs ont été contraints, dans certains cas, de remplacer les colonies. L'apiculteur compense alors les dommages causés par cette exposition massive en reproduisant artificiellement les colonies. Le nombre d'ingrédients actifs trouvés (principalement dans la cire et la nourriture pour larves) pourrait être utilisé pour prédire la mort de la colonie ou la nécessité de remplacer la reine 30 jours à l'avance. Parmi les ingrédients actifs clairement associés à une augmentation de la probabilité de la mort des colonies, le fipronil et le chlortalonil ont été signalés, en partie parce qu'ils étaient présents à des concentrations élevées.

Le calcul de la somme des dangers relatifs est une méthode très approximative, et le niveau de contamination mesuré dans cette étude est suffisant pour susciter l'inquiétude et suggérer les choix nécessaires : ne pas utiliser de pesticides, ni en apiculture ni en agriculture. Dans cette étude, seuls quelques ingrédients actifs ont été recherchés et, bien que présentant un scénario très alarmant, l'image fournie est une sous-estimation de l'exposition réelle.

Le niveau de contamination par les pesticides des miellats produits par des insectes tels que les pucerons, les cochenilles, les aleurodes et les psylles (groupe systématique Sternorrhyncha) est mal connu. Il serait intéressant d'en savoir plus sur le comportement des différents xénobiotiques dans la chaîne alimentaire constituée par le sol, les plantes, les insectes phytophages et les insectes pollinisateurs qui se nourrissent de miellat comme les fourmis, les abeilles domestiques, les abeilles solitaires (genre *Osmia*) et les bourdons (et les animaux insectivores et carnivores comme les oiseaux).

Les abeilles ouvrières adultes sont généralement utilisées pour tester la toxicité des pesticides, mais selon leur âge, elles mènent une vie différente et ont des caractéristiques physiologiques différentes. Par conséquent, un même niveau d'exposition peut générer des effets très différents selon l'âge des abeilles, et c'est ce qu'a montré une étude sur des abeilles âgées de 4 à 42 jours. L'exposition aux insecticides génère différents effets avec l'âge, et l'effet cumulatif sur la mortalité augmente avec l'âge.¹²³⁵ Ainsi, les tests de laboratoire destinés à évaluer la toxicité aiguë ne peuvent pas représenter efficacement toutes les conséquences possibles pour l'ensemble de la colonie.

Lorsque (en supposant que cela soit possible) nous apprendrons les effets additifs et synergiques des diverses combinaisons d'ingrédients actifs et d'autres facteurs déstabilisant la santé des insectes, il sera presque certainement trop tard. Au lieu de se concentrer sur l'idée de choisir les combinaisons de pesticides les moins dangereuses, il est beaucoup plus clairvoyant d'essayer d'organiser un système de culture des plantes sans pesticides et plus durable.

L'ÉVALUATION DES RISQUES POUR LES AUTRES POLLINISATEURS

La présence de pesticides génère des problèmes encore plus évidents dans les zones géographiques où la biodiversité n'est pas encore irréversiblement compromise, comme les zones agricoles proches des forêts primaires (par exemple en Amazonie). Nous avons l'habitude de considérer les abeilles domestiques comme les pollinisateurs par excellence, mais il existe des dizaines de milliers d'autres espèces d'insectes qui sont essentielles à la production alimentaire et que nous éliminons sans savoir quels avantages elles procurent. Par exemple, les abeilles sans dard (Hymenoptera Apidae Meliponini) sont des pollinisateurs importants pour de nombreuses espèces végétales : entre 40 et 90% des arbres en milieu tropical.¹¹⁹⁹ Ces abeilles sont apparues avant les abeilles sans dard et ont développé d'importantes symbioses avec les plantes, résultat d'une co-évolution d'au moins 65 millions d'années. Les dommages causés par les pesticides aux insectes sont principalement étudiés sur les abeilles domestiques, mais les

effets sur les autres espèces de pollinisateurs sont quelque peu différents et plus graves. Le modèle de l'abeille domestique ne peut pas fournir d'informations utiles pour l'analyse des risques sur les autres pollinisateurs. Certaines abeilles sans dard sont des insectes sociaux dont les caractéristiques biologiques les rendent potentiellement utiles pour la pollinisation des cultures. On connaît plus de 600 espèces d'abeilles méliponines (sans dard) qui peuvent construire des nids à l'aide de cire, de résine végétale et de boue. Elles peuvent également recueillir des pétales, des feuilles, des fèces et des graines. Par conséquent, par rapport aux abeilles domestiques, elles collectent également d'autres matériaux tels que la terre, ce qui constitue un facteur de risque non présent chez les abeilles domestiques. Elles peuvent également collecter du pollen et du nectar, mais elles parcourent des distances beaucoup plus courtes que les abeilles domestiques (2 km au maximum contre 10 km). Les abeilles sans dard sont généralement plus petites (chez certaines espèces, les abeilles ouvrières peuvent peser plus de 60 fois moins que les abeilles domestiques) et peuvent produire des œufs qui servent de nourriture plutôt que de moyen de procréation. Le cycle de vie de l'œuf à l'adulte est généralement beaucoup plus long que celui de l'abeille domestique (deux fois plus long, les larves se nourrissent donc plus longtemps : 12-15 jours au lieu de 5 jours), elles produisent moins d'œufs et certaines espèces peuvent voler la nourriture d'autres abeilles (*Lestremellita*).¹¹⁹⁹ Ces différences ajoutent d'autres variables à l'analyse des risques liés aux pesticides, qui ne sont pas négligeables. En outre, la reproduction artificielle n'est pas possible pour la plupart des espèces et il n'existe pas de protocoles disponibles pour une application en laboratoire.

L'importance des insectes pollinisateurs autres que les insectes d'élevage est sous-estimée ou, dans certains cas, inconnue. Certaines abeilles solitaires sont utiles pour la pollinisation de cultures telles que le colza et les fraises en Europe, les tournesols en Amérique du Nord, les orchidées en Asie et le café en Afrique.¹²³⁸ L'impact des pesticides sur les abeilles solitaires n'est pas connu en détail mais est certainement négatif. L'Agence européenne de sécurité des aliments a suggéré (en 2013) d'inclure *Osmia bicornis* dans l'évaluation des risques des pesticides. Cette abeille solitaire se reproduit facilement et se nourrit de nectar et de pollen. Ce dernier est également la principale nourriture des larves de cet insecte. L'exposition d'*Osmia bicornis* à des concentrations de pesticides inférieures à celles enregistrées dans le pollen entraîne des effets négatifs. Les colonies d'abeilles solitaires nourries avec du pollen contaminé par des insecticides (par exemple l'organophosphate chlorpyrifos ou le pyréthroïde cyperméthrine) enregistrent une réduction de la survie des larves et une diminution de la masse larvaire à de très faibles concentrations : quelques milliardièmes de gramme par gramme de pollen, c'est-à-dire à des concentrations bien inférieures aux plus élevées enregistrées dans le pollen.¹²³⁸ Cette étude démontre que l'on peut enregistrer dans le pollen collecté naturellement des concentrations d'insecticides plus élevées que celles capables de compromettre la capacité de survie d'*Osmia bicornis*.

L'abeille domestique est utilisée comme référence pour obtenir des informations toxicologiques des pesticides sur les pollinisateurs. En raison des différences génétiques, environnementales et biologiques, les résultats de l'évaluation des risques obtenus avec les abeilles domestiques ne sont pas utiles pour l'estimation des risques pour d'autres organismes non ciblés. L'exemple de *Melipona scutellaris* est donné, qui est un hyménoptère social sans dard (famille des Apidae) originaire du Brésil. Il vit en colonies pouvant compter jusqu'à 6.000 individus et produit jusqu'à 10 kg de miel par an. Cet insecte est capable d'effectuer un type de pollinisation que les abeilles domestiques ne font pas : il génère des vibrations qui induisent le détachement mécanique du pollen des anthères. On a identifié au moins 50 genres d'abeilles capables de favoriser le détachement du pollen par vibration.¹²³⁷

L'exposition de *Melipona scutellaris* à l'insecticide néonicotinoïde thiamethoxam génère des effets beaucoup plus graves que ceux enregistrés par *Apis mellifera*, la même mortalité étant provoquée par une dose quatre fois inférieure (au Brésil, le thiamethoxam est utilisé dans la

culture du café, du coton, des agrumes et du soja).¹²³⁷ L'abeille domestique n'est pas un modèle approprié pour établir des seuils de sécurité pour tous les pollinisateurs et autres insectes non ciblés. Cependant, si nous continuons à attendre jusqu'à ce que nous disposions d'informations scientifiques adéquates sur la certitude des effets négatifs sur les autres pollinisateurs, il sera trop tard : nous les aurons exterminés. Nous devons agir de manière préventive en adhérant au principe de précaution : tant qu'il n'est pas prouvé que les pesticides ne nuisent pas aux organismes non ciblés, ils ne doivent pas être utilisés.

LES PESTICIDES SÛREMENT TRÈS DANGEREUX POUR LES ABEILLES

À la fin de cette discussion élaborée et incomplète, il est possible d'essayer de résumer, sous forme de liste, certains pesticides qui sont définitivement dangereux pour les abeilles. La réglementation précise que les pesticides très toxiques pour les abeilles sont ceux qui appartiennent au groupe 1, c'est-à-dire ceux dont la dose létale est inférieure à 2 millièmes de gramme par insecte ($DL_{50} < 2\mu\text{g}/\text{abeille}$).^{35, 173, 500, 866} Mais malheureusement, certains pesticides peuvent causer des dommages à des êtres vivants tels que les abeilles à des concentrations mesurées à une échelle inférieure, c'est-à-dire en milliardièmes de gramme par abeille. Par exemple, l'imidaclopride, qui appartient à la famille des néonicotinoïdes (c'est-à-dire des molécules de synthèse dérivées de la nicotine), est capable de tuer 50% des abeilles par contact à une dose inférieure à 18 ng par abeille.¹³ Au fil du temps, les anciens pesticides ont été remplacés par d'autres beaucoup plus toxiques : les quantités d'insecticides capables de générer les mêmes effets négatifs ont été divisées par 1.000.

La détermination des concentrations, qui devrait permettre de classer les pesticides en classes de danger, génère en fait des résultats très variables, car elle dépend d'une multitude de facteurs, dont la plupart sont inconnus et difficiles à étudier en laboratoire. La classification est donc très pauvre car les connaissances dont nous disposons sont incomplètes. C'est une autre raison pour laquelle le principe de précaution devrait être appliqué : s'il n'est pas confirmé qu'ils sont inoffensifs, ils ne devraient pas être utilisés. La liste est la suivante : abamectine, acéphate, acrinathrine, aldicarbe, aldrine, aminocarbe, arsenicaux, avermectine, azinphos-éthyle, azinphos-méthyle, azodrine, bifenthrine, bendiocarbe, bufencarbe, cadusafohyl, carbaryl, carbophénothion, carbofuran, carbosulfan, chlorhydrate de cartap, céphate, chlordane, chlorfenvinphos, chlorpyrifos éthyle, chlorpiriphos méthyle, clothianidine, cyantraniliprole, cyfluthrine, cyperméthrine, DDT (dichlorodiphényltrichloroéthane), dinetofuran, décaméthrine, deltaméthrine, diazinon, dichlorvos, dichrotophos, dieldrine, diméthoate, dimeton-S-méthyl, disulfoton, d-phénothrine, EPN, emamectine, endosulfan, etofenprox, etrimfos, famphur, fenamiphos, fenazaquin, fenitrothion, fenoxycarb, fensulfathion, fenpropathrin, fenthion, fenvalerate, fipronil, flucythrinate, flubendiamide, formetanate, formothion, fosthiazate, glyphosate, heptachlore, heptenophos, hexaflumuron, imidachlorprid, indoxacarb, iprovalicarb, isophenphos, lambda-cyhalothrine, lindane, malathion, méthamidophos, méthidathion, méthyldéméton, méthiocarbe, méthomyl, méthylparathion, mevinphos, monocrotophos, naled, nicotine, ométhoate, oxamyl, oxydéméton-méthyl, parathion, perméthrine, phentoate, phorate, phosmet, phosphamidon, phoxim, pyréthrine, pyrimicarbe, pyrimiphos-méthyl, profenofos, propoxur, pyridaben, pyrimethanil, quinalphos, roténone, resméthrine, spinetoram, spinosyn A et D, stiropfos, tefluthrin, tenepfos, tetraethyl pyrophosphate, tetrachlorvinphos, thiamethoxam, thiodicarb, toxaphene, trichlorphon, vamidothion.

Au lieu d'essayer de dresser une liste de substances qui sont définitivement toxiques, nous devrions changer de perspective et nous demander s'il existe des substances capables d'exterminer des êtres vivants, à des doses de millièmes de gramme ou de milliardièmes de

gramme, qui sont inoffensives pour les espèces non ciblées. Il s'agit de substances qui modifient de manière irréversible des mécanismes fondamentaux pour la vie et donc omniprésents chez les êtres vivants (par exemple, en altérant la transmission nerveuse ou l'équilibre hormonal). Les changements négatifs causés chez les organismes non ciblés, même s'ils affectent des mécanismes physiologiques différents, peuvent être tout aussi importants pour la vie, de sorte que leur altération génère tout de même des effets dévastateurs. Nous nous laissons tromper par une erreur méthodologique encouragée par un refus plus ou moins conscient d'accepter les limites.

On trouve ci-dessous les doses létales qui tuent 50% des abeilles en 48 heures par contact, par ingestion et la demi-vie estimée (en jours) de certaines molécules dans le sol. ¹¹⁶⁸
Une demi-vie plus longue suggère que la molécule peut se bioaccumuler facilement.

Les trois chiffres indiquent respectivement : ¹¹⁶⁸

DL₅₀ contact (µg/abeille) - DL₅₀ ingestion (µg/abeille) - Demi-vie dans le sol (en jours).

Insecticides			
Bêta-cyfluthrine	0,031	0,050	13
Bifenthrine	0,015	0,20	87
Carbofuran	0,16	-	14
Chlorpyrifos	0,072	0,24	50
Clothianidine	0,039	0,004	121
Cyperméthrine	0,034	0,064	69
DDT	8,8	5,1	6.200
Diazinon	0,38	0,21	18
Endosulfan	6,4	21	86
Fenthion	0,22	-	22
Fipronil	0,007	0,001	142
Imidaclopride	0,061	0,013	174
Malathion	0,47	9,2	1
Mevinphos	0,094	-	1
Pyrèthre	0,18	0,057	-
Acaricides			
Acrinathrine	0,17	0,12	22
Amitraz	50	-	1
Coumaphos	20	4,6	-
Fenpyroximate	11	-	49
Tau-fluvalinate	8,7	45	4
Tetradifon	1.250	-	112
Fongicides			
Azoxystrobine	200	25	78
Boscalid	200	166	118
Captan	215	91	4
Carbendazim	50	-	22
Chlorothalonil	135	63	44
Myclobutanil	40	34	35
Propiconazole	50	77	214
Tébuconazole	200	83	47
Herbicides			
Métolachlore	-	110	90
Simazine	879	-	90

ABEILLES BIO-INDICATEURS D'UNE AGRICULTURE CHIMIQUE NON DURABLE

BIOSURVEILLANCES MONDIALES SUR LES PESTICIDES ET AUTRES MOLECULES COMME LES PCB (biphényles polychlorés)

Les résultats de certaines études de biosurveillance décrites dans des publications scientifiques sont résumés ci-dessous. Les études sont présentées par ordre chronologique (ou de publication) et résument les résultats sur les résidus de pesticides enregistrés dans les produits apicoles dans les pays étrangers. La plupart de ces études montrent que les abeilles sont exposées à des concentrations dangereuses de dizaines de molécules en même temps. Nous réalisons une grande expérience dont les effets globaux sont évidents : la réduction de la biodiversité et l'augmentation de la mortalité des insectes, même d'élevage. Grâce à cet ensemble dense et triste de données, nous espérons promouvoir des réflexions et des actions proactives, essentielles au changement nécessaire.

- La teneur en pesticides de la cire d'abeille (*Apis mellifera*) a été étudiée sur cinq sites différents en France. ⁶⁸ La recherche a commencé en 2002 et s'est terminée en 2003. Un total de 125 colonies d'abeilles provenant de 25 ruchers ont été échantillonnées et 16 insecticides et 2 fongicides ont été recherchés. Dans chaque rucher, 5 colonies ont été choisies pour être échantillonnées en octobre-novembre (chaque échantillon de cire pesait 15 g et le laboratoire en a utilisé 2 g : les analyses ont été effectuées à l'aide d'un chromatographe en phase gazeuse et d'un spectromètre de masse à triple quadrupôle). ⁷⁶ La cire a été choisie parmi celles exemptes de miel, de pollen, de larves ou d'autres substances afin de ne pas avoir d'interférences. En deux ans, 47 échantillons de cire ont été analysés (obtenus en mélangeant la cire de 5 colonies par rucher provenant de 5 sites différents). Aucun des ruchers ne pratiquait le nomadisme.

33 échantillons de cire sur les 47 testés, soit 70%, contenaient au moins une des molécules recherchées. Sur les 18 molécules recherchées, 14 ont été trouvées : 34% des échantillons de cire ne contenaient qu'une seule molécule et 36,2% contenaient entre 2 et jusqu'à 8 pesticides différents simultanément. Les résidus de tau-fluvalinate (utilisé contre *Varroa*, mais aussi par les agriculteurs), de coumaphos et d'endosulfan ont été trouvés le plus fréquemment, respectivement dans 62%, 52% et 23% des échantillons. Une étude canadienne (2003) a également révélé une fréquence élevée de tau-fluvalinate : 92% des échantillons de cire de couvain et 38,5% des échantillons de cire de miel. ⁶⁸

En France, le coumaphos est trouvé à la concentration moyenne la plus élevée de 792,6 µg/kg (concentration maximale de 4.113 µg/kg). Des résidus de cyperméthrine, de lindane et de deltaméthrine sont trouvés dans 21,9%, 4,3% et 2,4% des échantillons. ⁶⁸ Le fénitrothion n'a été détecté que dans un seul échantillon, mais c'est l'ingrédient actif trouvé à la plus forte concentration après le coumaphos (511 µg/kg). Au moment de l'étude, le coumaphos et le lindane étaient interdits comme utilisation agricole sur les plantes, et la seule formulation contenant du coumaphos autorisée contre le *Varroa* en 2002 et 2003 n'était pas vendue en France. Du lindane a été trouvé dans 2 échantillons à des concentrations de 5,3 et 32,2 µg/kg. Ainsi, les échantillons de cire ont été contaminés principalement par les pesticides utilisés par les apiculteurs et secondairement par ceux utilisés par les agriculteurs (organophosphorés et pyréthroides) et, malheureusement, des molécules non autorisées depuis des années ont également été trouvées (par exemple le lindane). Les auteurs soulignent qu'en Europe la

présence d'acaricides dans la cire n'est pas réglementée et que pour 62% des ingrédients actifs examinés, il n'y a pas assez d'informations toxicologiques disponibles sur les larves.

Des recherches menées en Allemagne (en 1999) ont également révélé que le coumaphos peut être trouvé dans 62,5% des échantillons de cire, et peut être déterminé à des concentrations élevées même 6 mois après le traitement de la colonie (529 µg/kg).⁶⁸ La concentration de coumaphos ne diminue pas après un traitement thermique de 2 heures à 140°C. La pratique des apiculteurs consistant à recycler la cire présente donc un risque accru pour les abeilles.

Des colonies d'abeilles en Asie ont enregistré la présence d'acaricides tels que le bromopropylate, le coumaphos, l'amitraz, le fluvalinate et le tetradifon (insecticide) dans la cire d'abeille.⁶⁸ La cire n'est pas utilisée comme nourriture par les abeilles mais celles-ci, après l'avoir sécrétée par leurs glandes abdominales, peuvent la mâcher, s'exposant ainsi aux pesticides qu'elle contient. En outre, les cellules de cire contiennent le miel, le pollen, les œufs, les larves et toute la colonie.

Quelques résultats d'analyses effectuées sur la cire d'abeille en France sont résumés ci-dessous.

⁶⁸

Le nom de la molécule, la catégorie à laquelle elle appartient et l'interdiction éventuelle de son utilisation sont indiqués. ⁶⁸ I = insecticide ; A = acaricide ; F = fongicide ; <u>V</u> = interdit.	Les quatre chiffres indiquent respectivement les résidus de pesticides dans les échantillons de cire (µg/kg) ; la fréquence des échantillons positifs (% de 47), les concentrations maximale et moyenne . (ND = non déterminé)	DL ₅₀ chez les larves (µg/larve)	DL ₅₀ chez les adultes (µg/abeille) Exposition O = oral C = contact
Azinphos-méthyle, organophosphate I A	2 10 817 446,1		0,43
Chlorpyrifos, organophosphate I A	3 7,3 19 14,9		0,11
Coumaphos , organophosphate I A <u>V</u>	24 52,2 4.112 792,6		3-6 O
Cyfluthrine, pyrèthroïde I A	5 12,2 31,9 20,1		-
Cyperméthrine, pyrèthroïde I A	7 21,9 76,3 36,3	0,066	0,06
Deltaméthrine, pyrèthroïde I A	1 2,4 14,7 14,7		0,7 O
Endosulfan, organochloré I A	11 23,4 243 88,8	28,1	21,8
Phénitrothion, organophosphate I A	1 2,1 511 --		0,28
Fenthion, organophosphate I A	0 0,0 ND ND		0,3
Lindane , organochloré I <u>V</u>	2 4,3 32,2 18,8		-
Malathion, organophosphate I A	4 8,5 18,1 15,1	0,74	0,73
Méthidathion, organophosphate I A	0 0 ND ND	0,27	0,27
Mevinphos, organophosphate I A	0 0 ND ND	0,44	0,31
Parathion, organophosphate I A	1 2,1 99 99	-	0,07-0,1 C 0,09-0,13 O
Parathion-méthyle, organophosphate I A	0 0 ND ND		0,29
Tau-fluvalinate, pyrèthroïde I A	13 61,9 422 196,4		65,85
Procymidone, dicarboximide F	1 2,1 27,7 --		-
Vinclozoline, dicarboximide F	1 2,1 21,5 --		-

Note : la méthode d'analyse utilisée ici a une limite de quantification pour le parathion-méthyle et la deltaméthrine de 20 µg/kg. DL₅₀ indique la concentration qui, dans des conditions expérimentales, tue 50% des insectes exposés par voie orale (ingestion) ou par contact.

- Quelques résultats d'une surveillance des produits apicoles menée en France entre 2001 et 2005 sont résumés.²⁴³ Les concentrations de pesticides (en µg/kg) dans le pollen, le miel, la cire et les abeilles vivantes sont indiquées.

Pesticides (µg/kg)	Pollen	Miel	Cire	Abeilles vivantes
Acide 6-chloronicotinique	1,2	1,2	--	0,9
Azinphos-méthyle	--	21,8	228,2	--
Carbaryl	142,4	30,8	--	214,3
Carbofuran	32,7	16,1	--	12,9
Coumaphos	423,5	37,9	647,5	1.546
Deltaméthrine	39	2,6	14,7	16,9
Endosulfan	45,8	--	50,95	8,3
Fipronil	1,2	--	--	0,5
Fipronil désulfynil	0,9	--	--	1,2
Fipronil sulphone	1,7	--	--	0,4
Inidaclopride	0,9	0,7	--	1,2
Lindane	7	8,5	18,8	10,5
Penconazole	17,6	--	--	7,5
Procymidone	--	--	27,7	--
Propiconazole	--	--	--	--
Tau-fluvalinate	334,1	44,7	220	65,5
Tébuconazole	16,5	--	--	18,2
Tétraconazole	--	--	--	17,3
Vinclozoline	--	109,4	21,5	--

Les résultats rapportés dans cet article montrent que la colonie d'abeilles est exposée à des dizaines de molécules différentes et à des concentrations dangereuses. Les molécules utilisées par les apiculteurs telles que le coumaphos et le tau-fluvalinate sont présentes en grande quantité. La contamination du pollen et du miel doit également être soulignée. Le premier est l'un des aliments les plus importants des stades juvéniles et le second est utilisé non seulement par les abeilles mais aussi pour la consommation humaine. Certaines molécules sont présentes à des concentrations dangereuses, comme le coumaphos, la deltaméthrine, l'endosulfan et le tau-fluvalinate. Les abeilles sont donc exposées à des concentrations létales, par ingestion ou par contact, même dans leur stade juvénile. En novembre 2006, l'utilisation du lindane a été interdite dans 52 pays et soumise à des réglementations restrictives dans 33 autres. En 2009, la Convention de Stockholm sur les polluants organiques persistants a établi une nouvelle restriction internationale sur l'utilisation du lindane en agriculture.²⁵¹

- Une étude publiée en 2010 a enregistré la présence de 258 pesticides dans les produits de la ruche en Allemagne : seuls 24% des échantillons ne présentaient aucun résidu (parmi ceux recherchés).⁴⁸⁴ Les fongicides étaient la catégorie la plus fréquemment trouvée et le coumaphos (acaricide utilisé par les apiculteurs) était la substance la plus fréquemment trouvée. Les mêmes travaux montrent que le fongicide chlorthalonil a été trouvé dans le pollen aux États-Unis jusqu'à des concentrations de 1.300 ppb. En France et aux États-Unis, 100% des échantillons de cire étaient contaminés par des acaricides utilisés par les apiculteurs (coumaphos et fluvalinate). Dans le monde entier, en raison de l'utilisation généralisée et systématique des acaricides, des

acariens (*Varroa*) résistants à ces molécules ont été enregistrés et, malheureusement, cela peut inciter les apiculteurs à utiliser des molécules non autorisées.

- En Espagne, 197 échantillons ont été testés pour la contamination par des acaricides dans la cire au cours des années 2003 - 2008. ¹²⁰⁹ Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Le nom de la substance active, le nombre d'échantillons, le nombre d'échantillons positifs (et le pourcentage), la gamme de concentration ($\mu\text{g}/\text{kg}$) sont indiqués dans l'ordre.

Chlorfenvinphos	197	189 (96%)	19.6 - 10.640
Tau-Fluvalinate	157	147 (94%)	27 - 88.659
Bromopropylate	33	29 (88%)	13,6 - 22,7
Amitraz	114	16 (14%)	12 - 63
Sulfate d'endosulfan	20	2 (10%)	144 - 231
Coumaphos	134	5 (3,7%)	17,3 - 195
Malathion	117	2 (1,7%)	160,5 - 184
Fluméthrine	15	1 (6,7%)	
Acrinathrine	15	1 (6,7%)	
Chlordiméforme	15	1 (6,7%)	
Chlorpyrifos	18	1 (5,6%)	

On constate que pratiquement tous les échantillons de cire sont contaminés, que les concentrations peuvent être élevées et que des molécules non autorisées comme le chlorfenvinphos (probablement utilisé illégalement pour lutter contre l'acarien *Varroa destructor*) sont détectées. Les molécules chlordimeform, chlorpyrifos, malathion et endosulfan sont utilisées en agriculture.

- En France, une surveillance des pesticides a été effectuée en 2008 et 2009 sur des abeilles vivantes (141 échantillons), du miel (141 échantillons) et du pollen (128 échantillons) provenant de 18 ruchers situés dans quatre régions différentes. ³⁹ Au total, 80 molécules ont été recherchées et les résultats ont montré que 95,7% des échantillons de miel, 72,3% des échantillons d'abeilles et 58,6% des échantillons de pollen contenaient au moins un ingrédient actif. La fréquence d'apparition était la plus élevée dans le miel, suivi du pollen et ensuite des abeilles, mais la plus forte concentration a été trouvée dans le pollen. Les ingrédients actifs les plus fréquemment trouvés étaient le fongicide carbendazim et les acaricides amitraz et coumaphos. Pour traiter les acariens (par exemple *Varroa destructor*) et les champignons (par exemple l'ascosphérose), les apiculteurs utilisent plusieurs molécules dangereuses qui peuvent rester dans le miel comme les acaricides amitraz, celazole, bromopropylate, coumaphos, fluméthrine, taufluvalinate et certains fongicides comme le carbendazim.

Les ruchers des zones rurales se sont avérés être les plus contaminés et les concentrations les plus élevées ont été enregistrées à la fin du printemps.

Au total, 20 molécules différentes ont été trouvées dans les abeilles, les échantillons contenant jusqu'à 6 substances actives en même temps (36,2% des échantillons contenaient au moins 2 résidus et 18,4% au moins 3 résidus).

Vingt-huit molécules ont été trouvées dans le miel, les échantillons contenant jusqu'à huit molécules simultanément (une moyenne de trois résidus par échantillon analysé). Parmi les échantillons de miel analysés, 80,8% contenaient au moins 2 résidus, tandis que plus de 3 résidus ont été trouvés dans 57,4% des échantillons.

Vingt-trois molécules ont été trouvées dans le pollen, certains échantillons contenant jusqu'à sept résidus simultanément. 30,5% des échantillons de pollen contenaient au moins deux substances actives et 11,7% en contenaient au moins trois.

Dans cette biosurveillance française, 80 molécules ont été recherchées et 37 (46%) ont été trouvées, dont 12 dans toutes les matrices examinées : 3 acaricides (2 métabolites de l'amitraz, amitraz I et amitraz II, et coumaphos), 3 fongicides (carbendazim qui est aussi un métabolite du thiophanate-méthyle, flusilazole et thiophanate-méthyle) et 6 insecticides (carbaryl, phosmet, butoxyde de pipéronyle, pyriproxyfen, tau-fluvalinate et triphénylphosphate). Les pesticides les plus fréquemment trouvés étaient :

- dans les abeilles vivantes : carbendazime (41,1%), triphénylphosphate (24,8%), coumaphos (17,8%) et amitraz II (16,3%) ;
- dans le miel : coumaphos (78,0%), amitraz II (68,8%), carbendazim (64,5%), phosmet (12,8%) et cyproconazole (11,3%) ;
- dans le pollen : carbendazime (34,4%) et amitraz II (14,8%).

Les concentrations les plus élevées étaient :

- dans les abeilles vivantes le fongicide thiophanate-méthyle (2.419 ng/g) et l'insecticide chlorpyrifos (180,2 ng/g) ;
- dans le miel l'acaricide amitraz II (116,1 ng/g) et le fongicide carbendazim (87,9 ng/g) ;
- dans le pollen les fongicides thiophanate-méthyle (3.674 ng/g) et carbendazim (2.595 ng/g).

Parmi les molécules ayant des effets dangereux sur les abeilles et trouvées à des concentrations élevées (c'est-à-dire ayant des effets létaux), on trouve les insecticides chlorpyrifos et phosmet.

Dans ce suivi, on retrouve des molécules interdites en France, comme l'acaricide coumaphos, retrouvé dans 78% des échantillons de miel (110/141). Le triphénylphosphate est également interdit en France, mais il a été trouvé dans 2% des échantillons de miel. Il convient de remarquer que le triphénylphosphate est également utilisé comme retardateur de flamme, il est donc possible qu'il soit libéré dans l'environnement par des activités industrielles (par exemple dans l'atmosphère).

Les ruchers étaient les plus contaminés pendant les mois où l'utilisation de pesticides était la plus élevée (avril-juin). Dans cette étude, le miel semble être la matrice la plus contaminée, alors que d'autres travaux ont montré que la matrice la plus contaminée était le pollen. Cependant, dans cette étude, le pollen a présenté les concentrations moyennes et maximales les plus élevées.

- Aux États-Unis, au cours des années 2006-2009, environ un tiers des colonies d'abeilles (*Apis mellifera*) sont mortes (en hiver). En raison de cette alerte, un vaste effort de surveillance a été financé, qui a donné des résultats inquiétants.⁵⁹⁷ En Amérique du Nord, dans 887 échantillons de pollen, de cire et d'abeilles, 121 pesticides différents sur les 200 recherchés ont été trouvés. Soixante pour cent des 259 échantillons de cire et des 350 échantillons de pollen contenaient au moins une molécule (saison 2007/2008). Dans l'ensemble, une moyenne de 6,5 molécules de pesticides différentes est trouvée par échantillon dans les 887 échantillons. 47% des échantillons de cire et de pollen contenaient les acaricides utilisés par les apiculteurs (fluvalinate et coumaphos) et un fongicide (chlorothalonil). 98% des échantillons de cire sont contaminés : jusqu'à 204 ppm par le fluvalinate, jusqu'à 135 ppm par le bromopropylate, jusqu'à 94 ppm par le coumaphos, jusqu'à 46 ppm par l'amitraz et ses métabolites, et de plus faibles quantités de chlorothalonil. Au total, 87 principes actifs et leurs métabolites ont été identifiés dans la cire. Dans les 259 échantillons de cire, on a trouvé une moyenne de six pesticides différents, avec un maximum de trente-neuf. La cire est la matrice qui constitue une source de contamination très importante et donc dangereuse à long terme.

Dans les 350 échantillons de pollen, on a trouvé 98 pesticides et leurs métabolites. Un fait très alarmant est qu'en moyenne, les échantillons de pollen testés contiennent 7,1 pesticides différents et que les échantillons individuels en contiennent jusqu'à 31. Il faut donc s'attendre à des effets synergiques négatifs. Dans le pollen, au moins dix pesticides dépassent la concentration d'un dixième de la DL₅₀ (dose létale qui tue 50% des abeilles en quelques heures), il n'est donc pas surprenant que les abeilles meurent. Le fongicide chlorothalonil dans le pollen récolté par les abeilles atteint des concentrations de 99 ppm, tandis que les insecticides aldicarbe, carbaryl, chlorpyrifos et imidacloprid, l'herbicide pendiméthaline et les fongicides boscalid, captan et myclobutanil sont tous trouvés à des concentrations de l'ordre de 1 ppm. Il convient de souligner à ce stade que le pollen est l'un des aliments les plus importants pour le développement des larves.

Dans les 140 échantillons d'abeilles, on a trouvé en moyenne 2,5 molécules, le nombre maximum de substances actives dans un seul échantillon étant de 25 : 83,6% des abeilles contenaient du fluvalinate, 60% du coumaphos et 8,6% du chlorpyrifos. Le fluvalinate et le coumaphos sont très persistants dans la ruche, leur demi-vie dans la cire est supérieure à 5 ans.

Cette étude montre que 98,3% des échantillons de pollen et de cire sont contaminés par deux pesticides ou plus, 91% par trois pesticides, 80% par quatre. Cinquante pour cent de ces échantillons contiennent au moins un ingrédient actif systémique. Les acaricides fluvalinate (pyréthroïde) et coumaphos (acaricide organophosphoré) constituent la paire de molécules la plus fréquemment combinée, dans 77% des échantillons, suivie par la paire fluvalinate et chlorothalonil (fongicide) dans 41% des échantillons, fluvalinate et chlorpyrifos (insecticide organophosphoré) dans 39,4% des échantillons et coumaphos et chlorothalonil dans 39,1% des échantillons. Il convient de souligner que les fongicides peuvent également être distribués pendant la floraison car il n'y a pas de restrictions, contrairement aux insecticides. Il n'est donc pas surprenant que les fongicides fassent partie des molécules les plus fréquemment retrouvées dans le pollen (par exemple le chlorothalonil) et que celles telles que la vinclozoline et l'iprodione soient enregistrées à des concentrations élevées : 32 et 5,5 ppm respectivement.

Dans tous les échantillons de cire, de pollen et d'abeilles, les molécules les plus fréquemment retrouvées, par ordre décroissant, étaient le fluvalinate et le coumaphos, suivis du chlorpyrifos, du chlorothalonil, de l'amitraz, de la pendiméthaline, de l'endosulfan, de la fenpropathrine, de l'esfenvalérate et de l'atrazine.

Les néonicotinoïdes ne sont pas retrouvés dans les abeilles mais dans la cire et le pollen : le thiaclopride dans 23 échantillons, l'imidaclopride dans 14, l'acétamipride dans 11 et le thiaméthoxame dans un. Dans certains cas, il a été possible d'associer la mortalité des abeilles à la présence de concentrations élevées de certaines molécules (dans les abeilles mortes) : pemethrin à une concentration de 19,6 ppm (DL₅₀ d'environ 1,1 ppm) et fipronil à une concentration de 3,1 ppm (DL₅₀ 0,05 ppm). Les concentrations étaient donc respectivement 20 fois et 62 fois supérieures à celles qui, dans des conditions expérimentales, tuent 50% des abeilles exposées en quelques heures.

Les acaricides (fluvalinate, coumaphos et amitraz) sont plus concentrés dans la cire que dans le pollen, tandis que les pesticides utilisés en agriculture se retrouvent à des concentrations équivalentes ou supérieures dans le pollen que dans la cire (aldicarbe, chlorothalonil, chlorpyrifos, endosulfan, pendiméthaline, fenpropathrine, azoxystrobine). Certains pesticides utilisés en agriculture, comme les pyréthroïdes et les régulateurs de croissance des insectes (méthoxyfénozide), ont tendance à se bioconcentrer dans la cire. Ces molécules étaient plus concentrées dans la cire que dans le pollen, bien qu'elles ne soient pas utilisées par les apiculteurs. Certains métabolites d'acaricides (métabolites lipophiles du fluvalinate et de l'amitraz) se retrouvent à des concentrations plus élevées dans les abeilles que dans la cire.

Ces informations permettent de prévoir des effets synergiques potentiellement désastreux, notamment parce que les concentrations totales de 200 ppm sont dépassées dans de nombreux

échantillons. La plupart des échantillons qui contenaient un fongicide avaient la présence simultanée d'un insecticide/acaricide de la famille des pyréthroides ou des organophosphorés. En réalité, les synergies possibles sont beaucoup plus complexes car on trouve en moyenne 6 à 7 molécules différentes dans un même échantillon, jusqu'à 31 molécules présentes simultanément dans le pollen ou 39 dans la cire. Bien que la profondeur scientifique de cette étude ait permis de faire la lumière sur l'origine de l'alarme écologique pour les pollinisateurs et autres, l'article évoque une augmentation de la mortalité des abeilles en raison d'une maladie dont les causes n'ont pas encore été découvertes : le *colony collapse disorder* ou mort subite des abeilles. Or, comme on l'a déjà écrit, les chercheurs ont trouvé dans les abeilles mortes des concentrations de pesticides (fipronil) jusqu'à 62 fois supérieures à la dose qui, dans les tests de laboratoire, peut tuer 50% des abeilles exposées en quelques heures (et 19 fois supérieures à la DL₅₀ de la pemethrine) ; le fluvalinate a été trouvé dans les abeilles à une concentration de 50% de la DL₅₀ ; dans le pollen, 10 pesticides dépassent les concentrations qui ont des effets sublétaux et létaux certains (un dixième de la DL₅₀). Bien que ces résultats ne laissent aucune place au doute, il est suggéré que les causes de l'augmentation de la mortalité des abeilles doivent être recherchées ailleurs : le *colony collapse disorder* ou la mort des abeilles, qui, selon les auteurs, n'est pas liée aux pesticides. Cette contradiction entre la qualité des résultats et les conclusions est incroyable : les auteurs déclarent n'avoir aucun conflit d'intérêts.⁵⁹⁷ Il est également incroyable que de nombreuses colonies aient survécu à ce déluge de poisons présents en concentrations mortelles.

- En Espagne, le chlorfenvinphos est enregistré dans 100% des 32 échantillons de cire examinés (à une concentration moyenne de 449 µg/kg : fourchette entre 20 µg/kg et 3.182 µg/kg), le tau-fluvalinate dans 96,8% des échantillons (à une concentration moyenne de 996 µg/kg et une concentration maximale de 12.978 µg/kg).⁶⁰⁶ Un résultat alarmant de cette étude est que tous les échantillons du mélange utilisé par les abeilles pour nourrir leurs larves contiennent des pesticides : on y trouve au total 16 ingrédients actifs. Cela signifie que les abeilles sont déjà systématiquement exposées à des mélanges complexes et nocifs dans leurs premiers stades.

- Une étude publiée en 2010 a déterminé la présence d'acaricides, utilisés par les apiculteurs aux doses recommandées, dans différentes matrices de ruches (amitraz, fluvalinate et coumaphos).⁶⁹² Les ruches étaient situées près de vergers de pommes en Slovaquie où l'insecticide diazinon était utilisé. Parmi les résultats de cette recherche, il est souligné que :⁶⁹²

- L'acaricide coumaphos a été retrouvé dans la gelée royale (elle est sécrétée par des glandes spéciales des jeunes abeilles) à une concentration de 400 ng/g (5 jours après le traitement).
- Le fluvalinate a été trouvé à des concentrations élevées dans la tête des abeilles (228 ng/g), où se trouvent des glandes importantes, et dans les larves (1.038 ng/g).
- Les doses d'acaricides considérées comme sûres pour l'agriculture ne le sont en fait pas car elles génèrent des effets (sublétaux) nuisibles à la colonie.
- Des produits plus sûrs comme l'acide oxalique et l'acide formique tuent les cellules intestinales et les glandes salivaires des larves.

- En Inde, les molécules les plus fréquemment retrouvées dans le miel sont le lindane (ou γ -hexachlorocyclohexane ou gamma-HCH) et en deuxième position le dichloro-diphényl-trichloréthylène (DDT).⁴¹ Ces molécules sont interdites depuis des décennies dans la plupart

des régions du monde en raison de leur persistance et de leur dangerosité. Le malathion a été trouvé à des concentrations supérieures aux limites maximales admissibles en Inde (2011).

- Une recherche publiée en 2011 et menée aux États-Unis a étudié la présence de pesticides dans la cire. En moyenne, 10 ingrédients actifs ont été trouvés en même temps et, dans l'ensemble, 39 pesticides et 7 métabolites étaient présents dans cette matrice.²⁴⁰ La cire est donc une matrice hautement contaminée et des effets synergiques sont possibles. Les pesticides peuvent passer de la cire à d'autres matrices et également contaminer les larves, le pollen et le miel dans les rayons. Parmi les ingrédients actifs les plus fréquemment retrouvés et aux concentrations les plus élevées, on retrouve ceux utilisés par les apiculteurs tels que l'acaricide coumaphos (mesuré jusqu'à une concentration de 22.100 ng/g) et l'insecticide pyréthroïde fluvalinate (mesuré jusqu'à une concentration de 24.340 ng/g). Les pesticides génèrent de nombreux effets négatifs dans les rayons, tels qu'une réduction de l'espérance de vie des abeilles adultes d'au moins 4 jours et un retard dans le développement des larves qui favorise l'acarien parasite *Varroa* ; il s'agit d'effets sublétaux qui peuvent contribuer à l'affaiblissement fatal de la colonie. Malheureusement, la cire contaminée est également recyclée et ces molécules (et leurs métabolites) peuvent y rester pendant des années.

- En France, une analyse de la teneur en pesticides de la cire de 125 colonies a révélé la présence de 14 des 18 principes actifs recherchés (16 insecticides et acaricides, et 2 fongicides), (article publié en 2012).⁴¹ Le tau-fluvalinate, le coumaphos et l'endosulfan sont les ingrédients actifs les plus fréquemment trouvés. Des molécules utilisées par les apiculteurs et les agriculteurs ont été détectées dans la cire.

- En Belgique, en 2012, la présence de 300 ingrédients actifs organochlorés et organophosphorés (utilisés à des fins agricoles et d'élevage) a été contrôlée dans la cire provenant de 10 ruches situées à différents endroits du pays.⁷⁰ Les analyses chimiques effectuées sur la cire (par les méthodes GCMS/MS et LC-MS/MS) ont révélé la présence de 18 des 300 pesticides testés (6%), avec une fréquence de 3 à 13 ingrédients actifs par échantillon et, malheureusement, aucun ne s'est révélé exempt de résidus.

- En Allemagne, une étude de surveillance sur 5 ans (2012-2016) a porté sur la teneur en pesticides de 281 échantillons de pollen collecté par les abeilles (des systèmes mécaniques de collecte de pollen étaient utilisés lorsque les abeilles butineuses revenaient à la ruche).¹⁸⁸ Dans cette enquête, 282 ingrédients actifs de pesticides ont été recherchés sur trois sites différents :

1. Une caractérisée par 60% de prairies permanentes et de vergers.
2. Une occupée principalement par des céréales telles que le blé, l'avoine, le colza, le maïs et l'orge.
3. Cette dernière est occupée à 30% par des cultures permanentes comme la vigne et les fruits à pépins et à 40% par des céréales comme le maïs. Le pollen a été collecté sur ce site pendant seulement trois années (2012-2014) au lieu de cinq.

Le pollen, 5 g par échantillon, a été collecté entre mars et août dans des ruches stationnaires et a été analysé par la technique de la chromatographie en phase gazeuse combinée à la spectrométrie de masse. Afin de définir le niveau de dangerosité des résidus trouvés, la procédure suivante a été appliquée : diviser la concentration de la molécule trouvée dans le pollen (en µg/kg) par sa DL₅₀ (dose suffisante pour tuer 50% des insectes exposés par ingestion

en quelques heures). La DL_{50} a été obtenue à partir de diverses bases de données accessibles sur Internet.^{189, 190, 191} Si le rapport entre la concentration enregistrée et la DL_{50} est supérieur à 50 et que les larves consomment 9,5 mg de pollen par jour, cela signifie que pendant les 10 jours d'alimentation en pollen, elles sont exposées à une dose quotidienne de pesticide égale à 0,5% de la DL_{50} , le risque est donc considéré comme élevé (quotient de risque). Dans le cadre de cette recherche, on a également mis en œuvre une analyse palynologique au microscope. Parmi les résultats obtenus, il est intéressant d'en souligner quelques-uns :

- Seul un cinquième des échantillons s'est avéré non contaminé.
- Sur les 282 ingrédients actifs recherchés, 73 ont été trouvés.
- Dans les échantillons de pollen du site numéro trois, 58 pesticides actifs ont été identifiés, dans le site numéro deux 37 et dans le site numéro un 24. Ainsi, le site numéro trois s'est avéré être le plus dangereux pour les abeilles.
- Dans la zone 3, le nombre moyen de molécules par échantillon était de 3,8 et dans la zone 2, de 2.
- Sur tous les sites, les fongicides étaient les molécules les plus fréquemment trouvées (plus de 50%).
- Dans la zone 3, les fréquences d'occurrence et les concentrations les plus élevées ont été enregistrées : jusqu'à 7.177 $\mu\text{g}/\text{kg}$ de pesticides.
- Le niveau de danger (quotient de risque supérieur à 50) n'a pas été dépassé pour les pesticides trouvés sur le site 1, mais a été dépassé six fois sur le site 2 (méthiocarbe et diméthoate) et 12 fois sur le site 3 (diméthomorphe, fenhexamide, fluazifop et indoxacarbe).
- Sur le site numéro trois, les insecticides néonicotinoïdes (clothianidine et imidaclopride) dépassent la valeur de 50 par un facteur de 4, ce qui donne un quotient de risque pouvant atteindre 600.
- Si l'on considère la somme des quotients de risque des pesticides trouvés simultanément dans les différents échantillons de pollen, 4,9% (7 échantillons) du pollen prélevé sur le site deux et 23% (13 échantillons) du pollen du site trois dépassent la valeur seuil (arbitraire) de 50.
- 27 pesticides sur les 73 trouvés dépassent les concentrations maximales autorisées : 3 sur le site 1, 10 sur le site 2 et 25 sur le site 3. 15 échantillons par an du site trois dépassent les limites maximales pour le pollen (2 du site un et 8 par an du site deux).
- Les pollens collectés dans les champs où se trouvent des vignobles présentent les plus fortes concentrations de pesticides (par exemple, le diméthomorphe trouvé jusqu'à 3.747 $\mu\text{g}/\text{kg}$).
- Les concentrations les plus élevées sont enregistrées au printemps.
- Dans certaines cultures, les traitements ont été effectués pendant la floraison.

Les substances trouvées avec des concentrations très dangereuses pour les abeilles étaient les suivantes : méthiocarbe, diméthoate, clothianidine, imidaclopride, fluazifop-butyl et fenhexamid.

En conclusion, les vergers ont été les cultures les plus contaminées, aucun échantillon n'étant exempt de pesticides. Malheureusement, lorsque les ruches sont situées à proximité de monocultures traitées aux pesticides et que les abeilles n'ont pas d'autres moyens de se nourrir, il est facile de trouver des concentrations de l'ordre du mg/kg (très élevées) dans les différentes matrices apicoles. D'autres études rapportées dans cette publication enregistrent des quotients de risque dans des vergers tels que des plantations d'agrumes de plus de 2.000, dans des vergers de pommiers de plus de 4.000 et dans certains cas de plus de 40.000.

- Une étude menée en 2013 par des chercheurs espagnols et argentins a examiné la présence de 120 pesticides dans 60 échantillons de cire d'abeilles provenant de 60 ruchers différents (par chromatographie liquide avec spectromètre de masse).⁶⁷ Chaque échantillon consistait en un morceau de cire (10 cm x 10 cm) prélevé au hasard dans une ruche de l'un des 60 ruchers sélectionnés (chaque rucher comptait entre 30 et plus de 360 colonies). Pour tester la répétabilité et la reproductibilité, chaque échantillon a été analysé 5 fois (le diméthoate a été utilisé comme *standard* interne).

Les 60 échantillons de cire contenaient des pesticides et on a trouvé au total 31 des 120 molécules recherchées (25,8%). 14% des échantillons contenaient au moins 2 pesticides et 5% en contenaient 3 à 4. Des métabolites (DMPF et DMF) de l'amitraz, qui est un acaricide utilisé par les apiculteurs pour combattre un parasite (l'acarien *Varroa*), ont été trouvés dans la cire à des concentrations comprises entre 5 et 466 µg/kg (somme du DMPF et du DMF), les insecticides organophosphorés à des concentrations comprises entre 1 et 464 µg/kg, les fongicides à des concentrations comprises entre 1 et 23 µg/kg, et les herbicides à des concentrations comprises entre 1 et 5,9 µg/kg. Les insecticides ont été trouvés à des concentrations plus élevées : une concentration moyenne de 16,2 µg/kg (14 insecticides sur les 64 recherchés ont été détectés). Les insecticides/acaricides les plus fréquemment détectés étaient : le diazinon, le phenthoate, le pyrimiphos-méthyle, le profenofos (organophosphorés présents dans 17,3% des échantillons) et le carbaryl, le fenoxycarb (carbamates présents dans 15,3% des échantillons). Les insecticides les moins fréquemment détectés (moins de 6% des échantillons) étaient l'acétamipride, l'imidaclopride et le fenpyroximate.

Dix des 46 fongicides recherchés (21,7%) ont été détectés : l'azoxystrobine, le difénoconazole, le myclobutanil et la spiroxamine ont été trouvés dans 4% des échantillons.

En Europe, l'imidaclopride, le thiaméthoxam et la chlotianidine ont été interdits en décembre 2013 (pour le traitement des semences, les applications au sol et sur les feuilles) afin de protéger les pollinisateurs (c'est l'année où ce travail a été réalisé). Le thiaméthoxame et la chlotianidine ne sont pas trouvés, tandis que l'imidaclopride est trouvé dans 5 échantillons à des concentrations comprises entre 3 et 5,1 µg/kg.

Du fipronil a également été retrouvé dans un échantillon : cette molécule a également été interdite en Europe en 2013.

Certains insecticides (diazinon, fenpyroximate ou les métabolites de l'amitraz) et fongicides (difénoconazole, fenbuconazole ou azoxystrobine) peuvent être trouvés simultanément dans la cire à des concentrations moyennes de 6,35 µg/kg pour les insecticides et de 10,07 µg/kg pour les fongicides. La présence simultanée de ces molécules pourrait provoquer des effets synergiques dus à l'inhibition du système de détoxification du tube digestif (complexe enzymatique du cytochrome P450). Des effets synergiques ont été enregistrés par la présence simultanée d'acaricides tels que le coumaphos et le tau-fluvalinate : l'effet toxique du tau-fluvalinate est multiplié par 3 si la ruche a été préalablement traitée au coumaphos.

Des néonicotinoïdes (acétamipride, imidaclopride et thiaclopride) ont été trouvés dans 6% des échantillons analysés. L'exposition simultanée à 2 néonicotinoïdes (imidaclopride et thiaclopride ou acétamipride) a été enregistrée dans 2 échantillons. Il y avait également 2 échantillons avec la présence simultanée de thiaclopride (4 et 5,51 µg/kg) et d'acétamipride (2 µg/kg). L'un de ces deux échantillons contient également trois fongicides : fenhexamid (23 µg/kg), myclobutanil (4 µg/kg) et penconazole (3 µg/kg).⁶⁷ Ainsi, des effets synergiques peu connus mais probablement très dangereux pour la santé des abeilles sont possibles.

Voici quelques résultats sur les résidus de pesticides trouvés dans 60 échantillons de cire d'abeille.⁶⁷

Nombre d'échantillons positifs sur 60		Plages de concentration en µg/kg
Insecticides		
1. Acétamipride	6	1 - 4
2. DMF + DMPF (Amitraz) 20		5 - 464
3. Carbaryl	1	1
4. Chlorantraniliprole	2	1 - 2
5. Diazinon	7	2 - 9,8 (concentration moyenne de 5,11 µg/kg)
6. Phenpyroximate	3	1
7. Fipronil	1	1
8. Flufenoxuron	1	3
9. Imidaclopride	5	3 - 5,1
10. Indoxacarbe	1	18,1
11. Phenthoate	1	4
12. Pyrimiphos-Méthyl	1	3
13. Profenofos	1	2
14. Thiaclopride	3	4 - 10,4
Herbicides		
1. 2,4-D	4	3 - 18,9
2. Pendiméthaline	2	1
3. Propyzamide	1	4
4. Terbutylazine	6	3 - 12
Fongicides		
1. Azoxystrobine	2	1
2. Bupirimate	1	1
3. Diphénoconazole	2	1
4. Fenbuconazole	1	5,2
5. Fenhexamid	1	23
6. Kresoxim-Methyl	2	1 - 5
7. Myclobutanil	4	2 - 4
8. Penconazole	2	2 - 3
9. Spiroxamine	4	1 - 2

- En Amérique du Nord, une surveillance de 4 ans (2009-2012) de la présence de pesticides dans les produits apicoles provenant de ruchers fixes dans six États a été réalisée. Les ruchers étaient situés dans des zones ayant des utilisations différentes du sol : entre 4% et 68% des terres utilisées pour l'agriculture et entre 0% et 35% pour les zones résidentielles.¹²⁰³ Au total, 168 échantillons de pollen et 142 échantillons de cire ont été prélevés. 82 pesticides, 8 métabolites et une molécule synergique ont été détectés. Sur les 91 molécules trouvées, 38 (42%) sont des insecticides, 29 (32%) des fongicides et 23 (25%) des herbicides. 78 pesticides sont trouvés dans le pollen (32 ont été trouvés uniquement dans cette matrice), 58 dans la cire (12 ont été trouvés uniquement dans cette matrice). En général, les insecticides sont la classe de pesticides que l'on retrouve dans les plus fortes concentrations et le plus fréquemment. Les fongicides les plus fréquemment détectés dans la cire étaient l'azoxystrobine (39% des 142 échantillons) et la pyraclostrobine (37%), tandis que la plus forte concentration d'un seul fongicide a été enregistrée pour le carbendazime (137 ppb).

Dans les échantillons de pollen, 20 herbicides différents ont été trouvés, et dans la cire 14 (9 ont été trouvés uniquement dans le pollen et trois dans la cire). Dans le pollen, l'atrazine était l'herbicide le plus fréquemment retrouvé (dans 50% des 168 échantillons), tandis que le diuron présentait la plus forte concentration (275 ppb). L'atrazine et le diuron sont également les herbicides les plus fréquemment retrouvés dans la cire (34% et 29% des 142 échantillons), tandis que la plus forte concentration a été enregistrée pour l'halosulfuron-methyl (386 ppb).

Trente-cinq des 38 insecticides détectés ont été trouvés dans le pollen et 24 dans la cire. Quatorze insecticides étaient présents uniquement dans le pollen et deux uniquement dans la cire. Dans le pollen, le carbaryl était l'insecticide le plus fréquemment trouvé (26% des 168 échantillons), l'imidaclopride ou ses métabolites dans 6% des échantillons ; la concentration la plus élevée a été enregistrée pour le spinetoram (645 ppb).

Dans la cire, l'acaricide coumaphos a été détecté dans 86% des 142 échantillons et le fluvalinate dans 78% des échantillons (des métabolites d'amitraz ont également été trouvés avec une fréquence élevée). Au cours des années où la surveillance a été effectuée, le coumaphos n'était pas autorisé pour un usage agricole, mais uniquement pour l'apiculture.¹²⁰³

Jusqu'à 13 résidus sont trouvés dans le pollen au même moment, avec une moyenne de 4 résidus par échantillon (jusqu'à 9 résidus sont trouvés en moyenne dans les échantillons de pollen dans certaines zones géographiques au même moment). Parmi les molécules les plus fréquemment retrouvées dans le pollen, on trouve l'herbicide atrazine (inhibe la photosynthèse), l'insecticide carbaryl, le fongicide carbenzadim, puis les insecticides chlorpirifos, pendiméthaline et les fongicides azoxystrobine et propiconazole.

Ces recherches montrent également qu'il existe une exposition multiple aux effets dévastateurs : la mort de la majorité des colonies dans de nombreux ruchers est enregistrée.

- En Égypte, en 2013, les concentrations de pesticides organochlorés et de pyréthroïdes ont été étudiées dans 100 échantillons de miel de différentes origines botaniques (5 g d'échantillons ont été analysés par la technique de chromatographie en phase gazeuse avec analyseur à capture d'électrons et spectrométrie de masse).¹⁷⁸ Les molécules les plus fréquemment trouvées sont les suivantes : Le HCB ou lindane ou hexachlorobenzène¹ (interdit par l'Union européenne) est retrouvé dans 68% des échantillons, la perméthrine (pyréthroïde) dans 22% des échantillons, l'heptachlore-époxyde dans 16% des échantillons, l'endrine dans 14% des échantillons, l'aldrine dans 13% des échantillons. Le DDT et ses métabolites ont été trouvés dans 16% des échantillons. Les molécules organochlorées sont persistantes et se

¹ L'hexachlorobenzène (HCB) ou lindane, introduit pour la première fois en 1945, a longtemps été utilisé en agriculture, principalement comme fongicide pour le stockage des céréales, jusqu'en 1981, date à laquelle la Communauté européenne a interdit son utilisation en agriculture. La structure chimique est relativement simple, puisqu'elle consiste en un cycle benzénique hexachlorosubstitué. Cette molécule est également libérée dans l'environnement comme sous-produit de certains processus industriels, comme impureté lors de la production de certains pesticides et lors de l'incinération des déchets municipaux. Ses caractéristiques chimiques et physiques, telles que sa semi-volatilité, sa stabilité chimique et sa résistance à la biodégradation, font que le HCB est classé comme un polluant environnemental persistant et bioaccumulatif. Il est sujet au transport atmosphérique à longue distance et fait partie des substances incluses dans la Convention de Stockholm sur les polluants organiques persistants (POP) et le Protocole sur les POP (LRTAP-POP) de la Convention sur la pollution atmosphérique transfrontalière à longue distance de la Commission économique des Nations unies pour l'Europe (CEE-ONU).

¹⁸⁰Certaines données sur la toxicité pour l'homme proviennent de la production de HCB en Turquie, qui a donné lieu à environ 600 cas (manifestant une porphyrie avec ulcères cutanés, changement de couleur de la peau, arthrite et problèmes de foie, de système nerveux et d'estomac). Le HCB a été classé par le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC) comme un cancérigène humain possible (groupe 2B) et comme un perturbateur endocrinien potentiel. En 1974, le CIRC avait déjà signalé que des molécules telles que l'aldrine, la dieldrine et le lindane avaient des effets cancérigènes.

bioaccumulent facilement dans les tissus. Dans ce travail, la détection de DDT (et de ses métabolites DDD et DDE) est attribuée de manière optimiste à une contamination qui s'est vraisemblablement produite dans le passé. A cet égard, il convient de rappeler que le DDT est métabolisé par des micro-organismes en molécules tout aussi dangereuses et qu'il est utilisé pour produire une autre molécule : le dicofol.^{181, 183} En conclusion, certains organochlorés sont également officiellement interdits en Egypte depuis les années 1970 mais se retrouvent dans le miel : le DDT et le lindane.

- Une étude menée en Espagne, en 2014, a examiné la présence de pesticides utilisés dans les vergers, principalement d'agrumes mais aussi de pêches, de kakis et de prunes, dans 4 endroits différents.⁷⁵ Les abeilles qui meurent à l'intérieur de la ruche sont évacuées à l'extérieur ; dans cette étude, les abeilles mortes (*Apis mellifera*) ont été échantillonnées et collectées à l'aide de systèmes spéciaux placés à proximité de la ruche, qui empêchent l'accès aux oiseaux. La mortalité naturelle enregistrée dans cette étude est d'environ 20 abeilles par jour et par colonie (il peut y avoir des variations saisonnières influencées par différents facteurs). Des pics de mortalité allant jusqu'à 500 abeilles par jour ont été associés à l'utilisation d'insecticides dans les agrumes.

Trente-quatre échantillons d'abeilles mortes ont été collectés (entre janvier et juin) et examinés pour la teneur en 58 pesticides (chaque échantillon était composé de 5 g d'abeilles mortes et a été analysé par chromatographie liquide et spectromètre de masse quadripolaire). En moyenne, chaque échantillon d'abeilles mortes contenait 4 pesticides et 8 des 58 molécules ont été trouvées (jusqu'à 7 substances actives ont été trouvées en même temps). Le Coumaphos et les acaricides organophosphorés utilisés par les apiculteurs pour lutter contre l'acarien *Varroa* étaient les molécules les plus fréquemment retrouvées (dans 94% des échantillons). Le coumaphos a été trouvé à une concentration moyenne d'environ 50 ng/g (l'échantillonnage a commencé quelques mois après le retrait du système d'application des acaricides).

Parmi les pesticides utilisés sur le terrain, les plus fréquemment retrouvés dans les abeilles mortes étaient les organophosphorés, tels que le chlorpyrifos (79% des échantillons et à une concentration maximale de 751 ng/g) et le diméthoate (dans 68% des échantillons et à une concentration maximale de 403 ng/g), et les néonicotinoïdes, tels que l'imidaclopride (dans 32% des échantillons et à une concentration maximale de 223 ng/g et une concentration moyenne de 53 ng/g). Le chlorpyrifos et le diméthoate ont été utilisés dans les plantations d'agrumes. L'ométhoate est un métabolite du diméthoate qui est également toxique et que l'on retrouve avec une fréquence similaire. Le chlorpyrifos, le diméthoate et l'imidaclopride ont été trouvés simultanément dans 29% des échantillons d'abeilles mortes.

Un total de 8 molécules a été trouvé. Outre ceux déjà mentionnés, le carbendazime (fongicide) a été retrouvé dans 32% des échantillons et à une concentration maximale de 616 ng/g, l'acétamipride dans 24% des échantillons et à une concentration maximale de 44 ng/g, et le fluvalinate dans 3% des échantillons et à une concentration de 91 ng/g.

L'analyse du pic de mortalité montre une association avec la présence de coumaphos et de chlorpyrifos dans tous les ruchers. Selon les auteurs, le coumaphos n'est pas responsable de l'augmentation de la mortalité car il se trouve à de faibles concentrations. La présence simultanée de chlorpyrifos et de diméthoate est associée à une mortalité accrue (500 abeilles par jour). Ce travail confirme, alors que c'était attendu, que l'application d'insecticides pendant la floraison des agrumes a un effet significatif sur la mortalité des abeilles. Le diméthoate est très dangereux pour les abeilles, c'est pourquoi il ne peut pas être distribué pendant la floraison et ne peut être utilisé que pendant le semis (Règlement CE 1107/2009). Malheureusement, l'utilisation illégale du diméthoate est confirmée. La forte concentration de néonicotinoïdes démontre également l'utilisation illégale de ces insecticides (par exemple pendant la floraison). En

conclusion, les pics de mortalité sont principalement associés au chlorpyrifos et au diméthoate, et par la suite à l'imidaclopride.

Voici les pesticides retrouvés dans les abeilles mortes lors de cette enquête menée en Espagne en 2014. ⁷⁵

Pesticides	Nombre d'échantillons positifs et pourcentage d'échantillons positifs sur 34 échantillons	Concentration minimale en ng/g d'abeilles mortes (poids humide o tel que)	Concentration moyenne en ng/g d'abeilles mortes (poids humide o tel que)	Concentration maximale en ng/g d'abeilles mortes (poids humide o tel que)
Coumaphos	32 (94%)	7	28	150
Chlorpyrifos	27 (79%)	3	100	751
Diméthoate	23 (68%)	13	102	403
Ométhoate	21 (62%)	2	34	109
Imidaclopride	11 (32%)	12	53	223
Carbendazim	11 (32%)	3	141	616
Acétamipride	8 (24%)	25	32	44
Fluvalinate	3 (9%)	10	52	91

Les pesticides recherchés dans les abeilles mortes étaient les suivants : acétamipride, acétochlore, alachlore, atrazine, atrazine-deséthyle, atrazine-désopropyle, azinphos-éthyle, azinphos-méthyle, buprofézine, carbendazim, carbofuran, carbofuran-3-hydroxy, chlorfenvinphos, chlorpyrifos, coumaphos, diazinon, dichlofenthion, diméthoate, diuron, DMA, DMF, DMPF, éthion, fénitrothion, fénoxon-sulfoxyde, fénoxon-sulfonefenthion, fenthion-sulfone, fenthion-sulfoxyde, fipronil, fluméthrine, fluvalinate, hexythiazox, imazalil, imidacloprid, isoproturon, malathion, methiocarb, metolachlor, molinate, omethoate, parathion-ethyl, parathion-methyl, prochloraz, propanil, propazine, pyriproxifen, simazine, tébuconazole, terbumeton, terbumeton-desethyl, terbuthylazine, terbuthylazine-desethyl, terbuthylazine-2-hydroxy, terbutryn, thiabendazole, thiamethoxam et tolclofos-methyl.

- En Pologne, au printemps 2015, une étude a porté sur la présence de 161 pesticides et d'autres polluants organiques persistants tels que les PCB (polychlorobiphényles) dans 53 échantillons de pollen prélevés dans trois ruches situées à proximité de champs de colza (chaque échantillon pesait plus de 50 g et était prélevé, à l'aide de pièges spéciaux, sur des abeilles butineuses rentrant à la ruche). ¹⁸⁴ Sur les 161 molécules recherchées, 29 ont été trouvées dans 60% des 53 échantillons de pollen examinés (la technique analytique utilisée était la chromatographie en phase gazeuse avec un analyseur à spectromètre de masse quadripolaire). 68% des échantillons positifs contenaient plus d'une molécule. Les catégories de molécules les plus fréquemment trouvées sont les fongicides (triazoles tels que le tébuconazole qui a été trouvé dans 20,8% des échantillons) et les insecticides (trouvés dans 30% des échantillons de pollen), y compris les néonicotinoïdes tels que le thiaclopride (trouvé dans 18,9% des échantillons) suivi du chlorpyrifos (trouvé dans 13,2% des échantillons). Le pesticide trouvé aux plus fortes concentrations était le prothioconazole (356 µg/kg), suivi du thiaclopride (136 µg/kg), de la deltaméthrine (69,8 µg/kg) et du tébuconazole (64,6 µg/kg). Des molécules non autorisées telles que le DDE sont également trouvées dans 5 des 53 échantillons : le DDE est associé au DDT, qui est interdit depuis plus de 20 ans. Dans 28% des échantillons, des concentrations de molécules de pesticides ont été trouvées dans des quantités supérieures à celles requises par la législation européenne (Règlement CE 396/2005), telles que : prothioconazole (3 échantillons), tétraconazole (1), thiaclopride (6), tébuconazole (2), deltaméthrine (1), bifenthrine (1), métamitron (1). ^{185, 186}

Les polychlorobiphényles (PCB) ont également été testés et ont été détectés dans les 53 échantillons à des concentrations allant jusqu'à 413 µg/g. ¹⁸⁴

Les auteurs estiment que si une larve consomme 9,6 mg de pollen par jour, elle ingère 1,3 ng du néonicotinoïde thiaclopride par jour, soit 235 ng au cours de sa vie (la DL₅₀ orale dans cette étude est considérée comme étant de 17,32 µg par abeille, ce qui est trop élevé). Les données de cette étude montrent que les larves d'abeilles peuvent consommer 0,384 ng par jour de chlorpyrifos, soit 0,069 µg au cours de leur vie. Ce montant représente environ 57% du LD₅₀. Dans les pires conditions, c'est-à-dire lorsque le pollen présente les plus fortes concentrations de pesticides, on peut facilement s'attendre à des effets néfastes importants. Les synergies peuvent renforcer la toxicité des néonicotinoïdes, bien qu'elles ne soient pas estimées dans ce travail, et les effets chroniques doivent être pris en compte. Des effets négatifs plus importants pourraient être enregistrés chez les reines d'abeilles car elles vivent plusieurs années (3-5).

Cette étude montre que dans les années 2005-2007 en Allemagne, 42 résidus différents ont été trouvés dans 70% des échantillons de pollen testés. ¹⁸⁴

Voici quelques-uns des pesticides trouvés dans les 53 échantillons de pollen prélevés sur des abeilles en Pologne au printemps 2015. ¹⁸⁴

Pesticides dans le pollen	Échantillons positifs sur 53	Concentration minimale (µg/kg)	Concentration moyenne (µg/kg)	Concentration maximale (µg/kg)
Tébuconazole	11 (20,8%)	4	29,8	64,6
Thiaclopride	10 (18,9%)	3,3	61,3	136
Chlorpyrifos	7 (13,2%)	4,4	15,7	40,1
Propiconazole	6 (11,3%)	4,2	23,4	48,3
DDE	5 (9,4%)	5,5	7,4	9,9
Cyprodinil	5 (9,4%)	4,8	16,3	23,7
Pyriméthanile	3 (5,7%)	12,6	17,1	23,7
Boscalid	3 (5,7%)	7,6	19,2	26,6
Fenhexamid	3 (5,7%)	13,8	18,2	23,8
Tétraconazole	3 (5,7%)	14	17,7	21,8
Prothioconazole	3 (5,7%)	56,6	181,9	356,7
Tau-fluvalinate	2 (3,8%)	13,5	20,6	27,7
Deltaméthrine	2 (3,8%)	23,7	46,7	69,8
Propyzamide	2 (3,8%)	12	17,7	23,3

Les autres ingrédients actifs trouvés dans 2 échantillons étaient : triadimenol, flusilazol, kresoxim methyl, propargit, azoxystrobin, cymoxanil ; les molécules suivantes ont été trouvées dans un seul des 53 échantillons de pollen : bifenthrin, chlortalonil, metalaxyl, fludioxonil, bitertanol, imidacloprid, metamitron, clethodim, difenconazol.

- Des recherches menées aux États-Unis (publiées en 2015) ont identifié la présence de 53 pesticides sur les 171 recherchés dans huit cultures : coton, amandes, maïs, pommes, luzerne, myrtilles, melons et courgettes. ⁷⁶⁵ Ces molécules sont présentes dans les fleurs, le pollen et les abeilles. Les cultures présentant le plus grand nombre d'abeilles mortes étaient le coton, les courgettes et la luzerne. Les abeilles qui sont mortes après avoir visité des champs de coton contenaient 11 pesticides. Les fleurs de courgette contenaient 8 pesticides, le pollen 11 et les abeilles mortes 14. Le pollen de luzerne contenait 5 ingrédients actifs, dont aucun n'a été trouvé dans les fleurs, et les abeilles mortes ont enregistré la présence de 10 pesticides différents (les molécules de pesticides individuels et leurs métabolites sont trouvés à des concentrations allant jusqu'à des milliers de parties par milliard). Les abeilles sont exposées à des dizaines de

molécules différentes et à leurs métabolites : celles qui retournent à la ruche contiennent moins de pesticides que les abeilles mortes, ce qui est normal. Le niveau d'exposition estimé, calculé à partir de la toxicité aiguë de chaque ingrédient actif et de la plus forte concentration enregistrée, n'est pas lié à la mortalité enregistrée dans les différentes cultures. Ce résultat confirme la présence d'effets autres que la toxicité aiguë qui sont tout aussi létaux.

- En Espagne, des recherches publiées en 2016 font état de l'évaluation de la présence de composés organophosphorés et azolés chez les abeilles.⁴⁶ Les composés organophosphorés et azolés se retrouvent dans l'eau, le sol et l'air. Les composés organophosphorés sont délibérément rejetés dans l'environnement car ils sont ajoutés comme additifs dans de nombreux matériaux et sont utilisés comme retardateurs de flamme, plastifiants (dans les appareils électroniques, les matériaux de construction, les plastiques, etc.) et ont une structure similaire aux insecticides organophosphorés. Parmi les pesticides organophosphorés, certains sont soupçonnés d'être neurotoxiques^I, tandis que d'autres sont cancérigènes^{II}.

Les composés azolés sont des fongicides utilisés en agriculture et dans les produits pharmaceutiques comme agents antifongiques : ce sont le fluconazole, le clotrimazole, le propiconazole et le tébuconazole. Ces fongicides sont considérés comme des perturbateurs endocriniens car ils perturbent la synthèse des hormones stéroïdes chez l'homme et l'animal ; chez l'abeille, ils inhibent des enzymes telles que l'aromatase (CYP19) et la synthèse de l'ergostérol.

Les chercheurs ont étudié la présence de ces deux catégories de molécules chez les abeilles. Cinq à huit abeilles butineuses par ruche ont été échantillonnées dans 10 colonies situées dans différentes régions d'Espagne (2014). Parmi les fongicides azolés, le propiconazole (trouvé dans 7 échantillons sur 10) suivi du tébuconazole (5/10) ont été les plus fréquemment enregistrés mais à de faibles concentrations (<7 ng/g). Du fluconazole et du clotrimazole ont été trouvés dans 2 échantillons.

Des organophosphorés ont été trouvés dans tous les échantillons d'abeilles butineuses, qui ont probablement été contaminés par les molécules présentes dans l'air.^{III} La contamination par les organophosphorés était plus élevée que celle par les fongicides.⁴⁶

- En Espagne, les pesticides contenus dans 35 échantillons de cire d'*Apis mellifera* ont été testés en 2016.⁵⁷ Il convient de remarquer que l'Espagne est le premier producteur européen de miel (2016). La cire examinée était soit vierge (moins de 7 jours), soit ancienne (achetée à différents vendeurs de cire recyclée ou à certains apiculteurs), et constitue la matrice la plus contaminée de la ruche. Il faut remarquer que les apiculteurs ont l'habitude de recycler la cire de ruche en la chauffant à plus de 70°C et en la centrifugeant à plus de 1.500 tours/minute. La cire contaminée peut transférer des substances au miel, au pollen, à la gelée royale et à la propolis (elle peut également recevoir des substances de ces matrices). Les opérations de recyclage des

^I Le phosphate de triphényle (TPhP) et le phosphate de tributyle (TBP).

^{II} Le phosphate de tris-(2-chloroéthyle) (TCEP), le phosphate de tris-(1,3-dichloro isopropyle) (TDCPP) et le phosphate de tris-(2-chloro-isopropyle) (TCPP).

^{III} Parmi les composés organophosphorés, le phosphate de tributyle (TBP) et le phosphate de tris-(2-chloro-isopropyle) (TCPP) ont été trouvés dans les 10 échantillons dans des quantités comprises entre 3,3 et 113 ng/g. Le phosphate de tributyle (TBP) est également produit par le transport sur roues (contenu dans les fluides hydrauliques). Le phosphate de tris-(2-butoxyéthyle) (TBEP) est retrouvé dans 8 des 10 échantillons à des concentrations inférieures à 13,1 ng/g. Le phosphate de tris-(2-chloroéthyle) (TCEP) et le phosphate de triphényle (TPhP) sont également présents dans 9 échantillons sur 10.

cires, telles que le traitement thermique (2 heures à 140°C), ne réduisent pas la concentration de substances actives telles que le coumaphos (sa demi-vie est comprise entre 115 et 346 jours).

Cinquante-huit pesticides ont été recherchés et chaque concentration a été obtenue à partir de la moyenne de deux mesures effectuées par chromatographie liquide avec spectrométrie de masse (triple quadripôle). Sur les 58 ingrédients actifs recherchés, 16 ont été trouvés ; 6 ingrédients actifs ont été trouvés dans la cire vierge et 11 pesticides dans la cire ancienne, avec une moyenne de 6,5 ingrédients actifs par échantillon. 86% des échantillons étaient contaminés par 4 ingrédients actifs ou plus, 74% des échantillons par 5 ingrédients actifs ou plus et 63% par 6 ingrédients actifs ou plus. La cire vierge a révélé 18 fois moins de contamination que la cire recyclée. La cire est contaminée principalement par les acaricides utilisés par les apiculteurs et, dans une moindre mesure, par les insecticides et les fongicides. Parmi les acaricides les plus fréquemment trouvés figurent le coumaphos (dans 100% des échantillons), le fluvalinate (86%) et l'amitraz (83%), à des concentrations maximales de 26.858, 3.593 et 6.884 ng/g, respectivement. Des résidus de DMF (métabolite de l'amitraz) ont été trouvés à une concentration maximale de 6.885 ng/g. Le coumaphos et le fluvalinate sont largement utilisés pour lutter contre l'acarien *Varroa destructor*. Cette recherche montre que le coumaphos et le fluvalinate sont également les pesticides les plus fréquemment retrouvés dans les échantillons de cire examinés aux États-Unis (98,1% des échantillons avec les concentrations moyennes les plus élevées de 3.300 et 7.474 ng/g respectivement).⁵⁷

Les autres acaricides trouvés dans la cire étaient le chlorfenvinphos, l'acrinathrine et la fluméthrine, respectivement dans 77%, 71% et 54% des échantillons.

Parmi les pesticides utilisés en agriculture, l'organophosphate chlorpyrifos était présent dans 40% des échantillons de cire, le dichlofenthion dans 29% des échantillons, le malathion dans 9%, le fenthion-sulfoxyde dans 6% et l'azinphos-méthyle, le carbendazim, l'éthion, l'hexythiazox, l'imazalil et le pyriproxyfen dans 3% des échantillons.

Dans les cires recyclées et/ou anciennes, les ingrédients actifs les plus fréquemment retrouvés étaient : le coumaphos, le fluvalinate et le chlorfenvinphos dans 100% des échantillons ; les pyréthroïdes tels que l'acrinathrine et la fluméthrine dans 90% des échantillons ; pour le dichlofenthion, le chlorpyrifos et le DMF, les fréquences étaient respectivement de 30%, 40% et 70%.

Les chercheurs de cette publication concluent que la cire dans son ensemble est très toxique pour les abeilles. La quantité moyenne de pesticides dans la cire vierge était de 2.726 ng/g, tandis que la quantité moyenne de pesticides dans la cire recyclée était de 14.422 ng/g (5 fois plus élevée). Le recyclage de la cire par les apiculteurs favorise l'accumulation de substances toxiques pour les abeilles ; la présence d'acaricides dans 100% des échantillons et à des concentrations élevées favorise l'apparition de parasites résistants comme le *Varroa destructor*. Les concentrations élevées de l'organophosphate chlorfenvinphos, du pyréthroïde acrinathrine et des insecticides azinphos-méthyle, éthion et carbendazim suggèrent l'utilisation illégale de ces composés par les apiculteurs.

- Une étude menée en France entre 2012 et 2016 a examiné la présence de 13 pesticides et de leurs métabolites dans les ruches.⁶⁶² Au total, 488 échantillons d'abeilles, de cire et du mélange de pollen et de miel (*bee bread* ou nourriture pour larves) ont été analysés. Cette dernière matrice était la plus contaminée, avec 77% des 276 échantillons contenant au moins un pesticide. Une moyenne de deux substances actives par échantillon et un maximum de sept pesticides par échantillon ont été trouvés dans cette source de nourriture pour les stades juvéniles. 61% des 87 échantillons de cire et 38% des 125 échantillons d'abeilles contenaient au moins un pesticide. Les substances actives les plus fréquemment retrouvées dans toutes les matrices (parmi les 13 substances actives recherchées) étaient les néonicotinides (insecticides) et

le boscalid (fongicides). Cela démontre une fois de plus la dangereuse exposition à laquelle ces insectes sont soumis à un stade précoce de leur développement.

- Une étude publiée en 2017 a estimé l'exposition des abeilles aux néonicotinoïdes (insecticides systémiques) en contrôlant le miel. ³⁷³ 198 échantillons de miel provenant du monde entier ont été analysés pour détecter la présence de 5 néonicotinoïdes (acétamipride, clothianidine, imidaclopride, thiaclopride et thiaméthoxame). Sur les 198 échantillons de miel, 75% contenaient au moins un insecticide (l'imidaclopride dans 51% des échantillons), 45% contenaient deux ou plusieurs de ces molécules et 10% en contenaient quatre ou les cinq. La concentration moyenne de ces molécules était de 1,8 milliardième de gramme par gramme (1,8 ng/g \pm 0,56 ng/g) et la concentration maximale était de 56 ng/g. En Europe, les concentrations maximales autorisées dans le miel destiné à la consommation humaine sont de 50 ng/g pour l'acétamipride, l'imidaclopride et le thiaclopride, et de 10 ng/g pour le clothianidine et le thiaméthoxame.

La quantité de néonicotinoïdes présente dans le miel est suffisante pour générer des changements notables dans le comportement des abeilles. Cette recherche montre à quel point l'utilisation des néonicotinoïdes est répandue et que les abeilles sont exposées à des mélanges ayant des effets chroniques importants. La recherche ne porte pas sur la présence d'autres pesticides et ne permet donc pas d'estimer les éventuels effets additifs et synergiques.

- Les pesticides sont considérés comme très dangereux pour les abeilles s'ils ont une DL₅₀ de contact inférieure à 2 µg/abeille, alors qu'ils ne sont pas considérés comme dangereux si la DL₅₀ est supérieure à 100 µg/abeille. Certains acaricides peuvent être très dangereux, comme le tau-fluvalinate, dont la DL₅₀ est de 0,2 µg/abeille. Les acaricides peuvent contaminer la cire, qui est sécrétée par les glandes abdominales des abeilles ouvrières âgées de 12 à 18 jours. Une grande partie de la cire est recyclée par les apiculteurs afin de préserver la fatigue des abeilles, de gérer la croissance de la population des colonies et la production de miel.

En Belgique, la présence de l'acarien parasite *Varroa destructor* a été enregistrée pour la première fois en 1984. Depuis, les apiculteurs utilisent des acaricides synthétiques pour le combattre. En Belgique, le niveau de contamination des cires a été contrôlé entre 2015 et 2016 : 97,3% des 182 échantillons de cire dans lesquels 294 résidus de pesticides ont été trouvés étaient contaminés par une ou plusieurs des 54 molécules détectées. ¹²¹⁵ En moyenne, on trouve 5 principes actifs par échantillon, avec jusqu'à 12 molécules présentes en même temps.

Les acaricides tels que le tau-fluvalinate et le coumaphos sont les molécules les plus fréquemment retrouvées (respectivement 90% et 79%), suivis du propargite, du chlorfenvinphos, du bromopropylate (y compris le métabolite 4,4'-dibromo-benzophénone). Il faut remarquer que les auteurs de la publication rappellent que l'utilisation du tau-fluvalinate et du coumaphos en apiculture est interdite en Belgique. ¹²¹⁵ Un autre acaricide interdit (dans l'agriculture et l'apiculture), le bromopropylate (et son métabolite la dibromo-benzophénone), a également été enregistré dans 28% des échantillons.

D'autres molécules détectées avec une fréquence élevée étaient : l'insecticide perméthrine, l'insectifuge DEET (diéthyltoluamide ; trouvé dans 36% des échantillons), le fongicide pentachloroanisole (et son métabolite le pentachlorophénol), ainsi que le butoxyde de pipéronyle (un additif, trouvé dans 29% des échantillons, qui peut potentialiser les effets toxiques d'autres pesticides tels que les néonicotinoïdes, car il inhibe les systèmes de détoxification comme le cytochrome P450) ; le néonicotinoïde thiaméthoxam a été trouvé dans un échantillon.

Les cires recyclées se sont avérées être les plus contaminées : tau-fluvalinate jusqu'à une concentration de 8,7 mg/kg ; coumaphos jusqu'à 7,4 mg/kg et chlorpyrifos-éthyl jusqu'à 4,4

mg/kg (un échantillon de cire a enregistré de l'amitraz à une concentration de 16,7 mg/kg). Parmi les molécules très toxiques (DL_{50} inférieure à 2 $\mu\text{g}/\text{abeille}$) ont été retrouvées la perméthrine (dans 27,1% des échantillons), le chlorpyrifos-éthyl (dans 11,9% des échantillons), le p,p'-DDT, le lindane, le dianizon, la cyperméthrine, l'acrinathrine, la deltaméthrine, le DDT et la tétraméthrine. Il ne faut pas négliger la présence d'autres molécules interdites et incluses dans la Convention de Stockholm car considérées comme dangereuses : le DDT, le p,p'-DDT et le lindane (ce dernier dans 3,3% des échantillons).

Le chlorfenvinphos, un autre insecticide non autorisé en apiculture, a été trouvé dans 25% des échantillons de cire et, dans cette étude, il a été associé à l'enregistrement d'une mortalité accrue des colonies.¹²¹⁵ D'autres enquêtes ont également révélé des concentrations élevées de chlorfenvinphos : en Allemagne, 8,6% des échantillons présentaient des concentrations allant jusqu'à 6,4 mg/kg, en Italie 34,5% des échantillons présentaient des concentrations allant jusqu'à 0,63 mg/kg, en Espagne 88,5% des échantillons de cire présentaient des concentrations allant jusqu'à 10,6 mg/kg. Ces données soutiennent la suspicion que certaines molécules interdites sont utilisées en apiculture dans plusieurs pays européens. Les informations sont très alarmantes et pour aggraver la situation, il y a les synergies possibles : on trouve jusqu'à 12 pesticides en même temps, dont les effets cumulatifs sont largement inconnus mais certainement nocifs. Outre l'arrêt de l'utilisation des pesticides, le recyclage de la cire doit être évité dans le but de réduire la contamination des colonies d'abeilles et l'intention d'adopter des méthodes d'élevage moins artificielles.

- Les insecticides néonicotinoïdes peuvent être distribués sous forme de *spray* sur les feuilles, les graines ou dans le sol. Ces molécules sont largement utilisées en Chine dans les plantations de coton, qui sont des cultures nectarifères importantes pour les abeilles. L'utilisation de graines de coton traitées avec des insecticides néonicotinoïdes (imidacloprid et thiaméthoxam) peut nuire aux abeilles pendant la floraison. Il faut rappeler que la Chine cultive le coton sur de grandes surfaces et qu'elle est le premier producteur mondial de miel (au moins 400.000 t/an).¹²¹⁰

Un insecticide est classé comme très dangereux lorsque la DL_{50} (dose qui, par contact, tue au moins 50% des abeilles exposées en laboratoire en moins de 48 heures) est inférieure à 2 $\mu\text{g}/\text{abeille}$: pour l'imidaclopride, on enregistre une DL_{50} de 0,08 $\mu\text{g}/\text{abeille}$ et pour le thiaméthoxame de 0,024 $\mu\text{g}/\text{abeille}$; ce sont donc des substances très dangereuses. Les deux ingrédients actifs peuvent être distribués aux doses indiquées sur l'étiquette, soit entre 3,5 g et 5,3 g par kilogramme de graines de coton.

Une enquête menée en Chine en 2016 a vérifié la présence d'imidaclopride et de thiaméthoxame dans 130 échantillons de pollen, 130 échantillons de nectar et 195 échantillons de feuilles de coton pendant la floraison.¹²¹⁰ L'imidaclopride est trouvé dans tous les échantillons de pollen, tous les échantillons de feuilles et 89% des échantillons de nectar, tandis que le thiaméthoxame est trouvé dans 90% des échantillons de pollen, 56% des échantillons de nectar et 54% des échantillons de feuilles.

L'imidaclopride, distribué dans les graines de coton, est trouvé dans le pollen à des concentrations de 1,6 à 64,6 ng/g et dans le nectar à des concentrations allant jusqu'à 1,8 ng/g, tandis que le thiaméthoxame est trouvé dans 90% des échantillons de pollen à des concentrations allant jusqu'à 14,5 ng/g et dans le nectar à des concentrations allant jusqu'à 4,3 ng/g.¹²¹⁰ En général, la concentration d'imidaclopride était plus élevée dans le pollen que dans le nectar (jusqu'à 4 fois). Dans les feuilles, l'imidaclopride a été trouvé jusqu'à des concentrations de 45,1 ng/g, tandis que le thiaméthoxam a été trouvé jusqu'à des concentrations de 3,6 ng/g. Les concentrations d'imidaclopride sont généralement plus élevées que celles de thiaméthoxam ; il faut remarquer que l'imidaclopride est beaucoup plus persistant que le thiaméthoxam : dans le

sol, l'imidaclopride a des temps de demi-vie de plus d'un an, alors que le thiaméthoxam a des temps de demi-vie d'environ un mois.

Les concentrations enregistrées sont supérieures à celles générant des effets indésirables détectables en quelques heures sur les abeilles (supérieures à 10 ng/g pour l'imidaclopride), ces résultats confirment donc la présence d'un risque élevé pour les pollinisateurs, même en cas d'utilisation aux doses indiquées sur l'étiquette (les DL₅₀ par ingestion sont de 3,7 ng/abeille pour l'imidaclopride et de 5 ng/abeille pour le thiaméthoxame).

L'imidaclopride, distribué dans les graines de tournesol à une dose de 0,7 mg par graine, peut être retrouvé dans le pollen à une concentration moyenne de 3,9 ng/g et dans le nectar à une concentration moyenne de 1,9 ng/g, tandis que dans le pollen des plants de maïs, il peut être détecté à une concentration comprise entre 1 et 3 ng/g.¹²¹⁰ Le thiaméthoxame distribué dans le colza (à une dose de 3,2 g/kg de graine) peut être retrouvé dans le pollen à des concentrations comprises entre 2 et 9 ng/g et dans le nectar entre 3,2 et 12,9 ng/g.

Souvent, les évaluations des risques ne tiennent pas compte des expositions chroniques (par exemple, l'ingestion de pollen et de nectar stockés dans la ruche), des différents stades de développement (les larves se nourrissent principalement de pollen) et les effets sublétaux et synergiques (par exemple, les métabolites avec d'autres pesticides) sont sous-estimés. En Chine aussi, on constate une augmentation de la mortalité des abeilles et un déclin irréversible de l'abondance des espèces pollinisatrices sauvages. L'utilisation de pesticides et la simplification des écosystèmes naturels en champs agricoles industriels en sont deux causes fondamentales.

- En 2014-2015, une biosurveillance a été réalisée en Amérique du Nord (comté de Lonoke, Arkansas) dans des colonies situées dans deux zones : une zone agricole cultivée principalement avec du soja, riz, maïs et coton (seulement 15% de la zone n'était pas cultivée et 4% était occupée par la pisciculture) ; et une seconde où la plupart de la zone est occupée par des forêts et des pâturages.¹²⁰⁶

Avant le début de la surveillance, les colonies d'abeilles étaient contaminées par plusieurs pesticides : coumaphos (323 ppb dans la cire), fluvalinate (273 ppb dans la cire), chlorpyrifos (2,6 ppb dans la cire) et atrazine (97 ppb dans les paquets d'abeilles, petites colonies d'abeilles sans reine qui meurent en quelques semaines et sont utilisées pour les services de pollinisation).

Au cours des deux années de surveillance, 26 pesticides ont été détectés parmi les 174 recherchés. Dans les échantillons de miel prélevés sur le site occupé par les bois et les pâturages, deux matières actives sont retrouvées : le flubendiamide (2014) et le DMPF (2,4-diméthylphényl formamide ; 2015) ; dans les échantillons de pain d'abeille (mélange de pollen et de miel utilisé pour nourrir les larves), 4 pesticides sont retrouvés en 2014 et 3 en 2015 ; dans les échantillons d'abeilles adultes en 2014, aucun résidu n'est retrouvé, alors qu'en 2015, seules les matières actives utilisées par les apiculteurs sont détectées.

La cire prélevée sur les colonies de la zone agricole a enregistré 16 pesticides, tandis que celle de la zone forestière en a enregistré 9 en 2014 et 7 en 2015. Les molécules présentant les concentrations les plus élevées, sur les deux sites, étaient les acaricides coumaphos (159 ppb) et fluvalinate (129 ppb) utilisés par les apiculteurs. Les colonies situées à proximité de la zone agricole ont enregistré, comme on pouvait s'y attendre, la contamination la plus élevée.

- Aux États-Unis, 30 pesticides différents peuvent être utilisés pendant la floraison des vergers de pommiers, contaminant ainsi la nourriture utilisée par les abeilles pour nourrir leurs larves : un mélange de pollen et de miel appelé pain d'abeille. Au total, 18 principes actifs sur les 25 recherchés sont trouvés (article publié en 2017).⁷⁶⁷ Cette figure montre que les abeilles sont exposées à des mélanges complexes de substances dangereuses dès les premiers stades de

leur développement. Certains des ingrédients actifs trouvés n'étaient pas utilisés dans les vergers de pommiers. Les abeilles peuvent se déplacer dans un rayon de plusieurs kilomètres et on peut trouver des résidus de molécules distribuées dans les champs voisins et les années précédentes, comme le démontre cette recherche pour le thiaméthoxame et la cyfluthrine. Les ingrédients actifs les plus fréquemment trouvés étaient des fongicides, tandis que ceux susceptibles de présenter le plus grand risque pour les abeilles étaient des insecticides. Cette étude souligne l'existence d'une exposition multiple à des mélanges de fongicides, d'insecticides et d'herbicides, qui peut générer des effets synergiques et sublétaux très dangereux.

Une revue de la littérature scientifique montre que plus de 150 ingrédients actifs différents ont été trouvés dans la nourriture préparée par les abeilles pour nourrir leurs larves.

- En Pologne, les concentrations de 30 pesticides à l'intérieur et à l'extérieur du corps d'abeilles mortes provenant de colonies situées dans des zones urbaines ou rurales ont été évaluées (article publié en 2018).⁴⁷ Les abeilles mortes recueillies au fond des ruches ont été utilisées (5 abeilles mortes par échantillon). Des pesticides ont été trouvés à l'extérieur et à l'intérieur du corps des abeilles. Dans les abeilles collectées dans une zone rurale, l'ingrédient actif oxamyl a été trouvé à des concentrations 3 fois plus élevées que dans la zone urbaine, tandis que l'azinophosméthyl était plus concentré dans les abeilles des zones urbaines (5 ng/g). L'herbicide alachlore est utilisé dans les zones urbaines et rurales et se trouve donc à des concentrations similaires dans les deux zones. L'azinophos-éthyl et le coumaphos ne se trouvent que dans les zones urbaines. Le thiaméthoxame et le méthidathion n'ont été trouvés que dans les zones rurales. Les abeilles collectées dans la zone rurale étaient également contaminées par le méthidathion (8 ng/g), qui est un organophosphate interdit en Europe.

L'ométhoate, le qualiaphos, l'imidaclopride et l'oxydéméton-méthyle ont également été trouvés à l'extérieur du corps de l'abeille. Les composés hydrophobes sont plus susceptibles de se trouver à l'intérieur du corps de l'abeille et les composés hydrophiles à l'extérieur. Les concentrations les plus élevées de pesticides se trouvent dans les zones rurales et, en général, les molécules trouvées sur différents sites sont différentes. Les abeilles peuvent donc être utilisées pour obtenir des informations sur ce qui est distribué dans l'environnement.

- En République tchèque, les colonies d'abeilles ont été surveillées car les taux de mortalité ont augmenté entre 2015 et 2016.¹²²¹ Les concentrations de pesticides ont été mesurées dans les abeilles vivantes et mortes prélevées près des ruches, dans le pain d'abeille (un mélange de pollen, de miel et de sécrétion d'abeille) et dans les tissus végétaux des cultures suspectées d'être à l'origine de l'empoisonnement. Des abeilles ont également été prélevées sur trois sites où la mortalité n'a pas augmenté. Dans les 59 échantillons provenant des sites présentant des signes d'intoxication, 23 pesticides et 2 métabolites ont été trouvés. Dans les échantillons prélevés dans les zones où aucun empoisonnement d'abeilles n'a été enregistré, 16 pesticides et 1 métabolite ont été trouvés à des concentrations plus faibles que sur les sites précédents. Les molécules les plus impliquées dans les événements de mortalité étaient l'insecticide organophosphoré chlorpyrifos (mesuré dans les abeilles mortes à une concentration maximale de 289 ng/g), le néonicotinoïde imidacloprid (mesuré dans les abeilles mortes à une concentration maximale de 5,3 ng/g), et les pyréthroïdes cyperméthrine et deltaméthrine. Les autres molécules distribuées sur le terrain dans le même mélange et retrouvées dans les échantillons sont les fongicides prochloraz, azoxystrobine et tébuconazole. Une observation intéressante dans cette étude était que le poids des abeilles mortes était significativement inférieur à celui des abeilles vivantes.¹²²¹ De plus, les abeilles mortes ont enregistré la présence simultanée de molécules très toxiques (par exemple : cyperméthrine et prochloraz ; chlorpyrifos

et cyperméthrine ; chlorpyrifos, deltaméthrine, prochloraz et thiaclopride). Les résultats de la surveillance confirment que certaines mortalités sont dues à l'exposition aux pesticides, notamment ceux utilisés dans la culture la plus courante à proximité des ruchers : le colza.

Point positif, les néonicotinoïdes clothianidine, thiaméthoxane et imidaclopride sont interdits en Europe depuis 2018 et le thiaclopride depuis 2020 (sauf dérogations, réexamens et utilisations illégales).¹²²¹

- En Inde, 83 échantillons de miel monofloral et 17 échantillons de miel multifloral ont été examinés pour obtenir des informations sur la présence de 24 pesticides (article publié en 2018).¹²¹⁸ Neuf ingrédients actifs ont été trouvés dans 19% des 100 échantillons : 6 organophosphorés, 2 pyréthrines et 1 organo-chloré. Les molécules les plus fréquemment retrouvées sont : dichlorvos (dans 6 échantillons et à la concentration maximale de 226 ng/g), monocrotophos (dans 5 échantillons et à la concentration maximale de 430 ng/g), profenofos (dans 5 échantillons et à la concentration maximale de 43,2 ng/g), perméthrine (dans 4 échantillons et à la concentration maximale de 40 ng/g), éthion (dans 3 échantillons et à la concentration maximale de 28 ng/g), et lindane (dans 3 échantillons et à la concentration maximale de 99 ng/g ; le lindane est interdit en Inde depuis 2013). On a également trouvé du phorate, du chlorpyrifos et de la cyperméthrine. Les miels de coton et de tournesol se sont avérés être les plus contaminés. Peu de molécules sont recherchées dans cette étude, mais 18% des miels présentent des concentrations en pesticides supérieures aux limites maximales autorisées pour l'exportation vers l'Europe (10 ng/g ; les auteurs précisent qu'en Inde il n'existe pas de limite maximale réglementée pour les résidus de pesticides dans le miel).¹²¹⁸

Les polluants organiques persistants sont diverses substances telles que les insecticides organochlorés, les biphényles polychlorés (PCB) et les éthers diphényles polybromés (PBDE). En Argentine, l'utilisation de pesticides a augmenté d'au moins 300% au cours des 15 dernières années, le chlorpyrifos et la cyperméthrine étant les molécules les plus utilisées.¹²³⁰ Les principales cultures en Argentine sont le soja, le maïs, le blé et le tournesol. Une étude menée dans la province de Buenos Aires a examiné la présence de polluants organiques persistants et de l'insecticide chlorpyrifos sur différents produits apicoles. Les colonies d'abeilles étaient situées dans trois types de sites : l'un dans une zone dédiée à l'arboriculture et à l'horticulture, un autre principalement occupé par le soja et un troisième près d'un centre de traitement des déchets municipaux (occupant 102 ha et recevant 1.150 t de déchets solides municipaux par jour).¹²³⁰ Les produits apicoles ont été échantillonnés en août et septembre 2016. On trouve des pesticides à des concentrations élevées à proximité des champs de soja et du site d'élimination des déchets. De nombreuses molécules toxiques et interdites sont retrouvées dans les échantillons d'abeilles : le DDT (et ses métabolites jusqu'à 11,3 ng/g), bien que son utilisation soit également interdite en Argentine depuis 1998 ; l'endosulfan, également interdit mais depuis 2013 ; le lindane, interdit depuis 1998 ; l'heptachlore, interdit depuis 1998 ; et la dieldrine, interdite depuis 1980. L'insecticide organophosphoré chlorpyrifos est présent dans les colonies proches des cultures de soja où il est utilisé (à des concentrations allant jusqu'à 8,9 ng/g chez les abeilles). Les PCB sont trouvés à une concentration maximale de 47,7 ng/g dans les abeilles à proximité de la décharge. Les PBDE sont également présents à des concentrations élevées (jusqu'à 80 ng/g).

Le pollen stocké dans la colonie était également contaminé par des pesticides (par exemple le chlorpyrifos à une concentration maximale de 5,6 ng/g), des PCB (à une concentration maximale de 12,8 ng/g) et des PBDE (à une concentration maximale de 0,7 ng/g). Les

concentrations de PCB et de PBDE dans le pollen étaient les plus élevées sur le site où se trouve le centre d'élimination des déchets.¹²³⁰

Tous les échantillons de miel contenaient du DDT (jusqu'à 7,7 ng/g), du lindane (jusqu'à 2 ng/g), de l'endosulfan (jusqu'à 1,5 ng/g) et du chlorpyrifos (jusqu'à 3,9 ng/g). On trouve des PCB et des PBDE dans certains échantillons de miel.

Les échantillons de sol étaient également contaminés par ces substances persistantes, comme on pouvait s'y attendre : DDT jusqu'à une concentration de 2,8 ng/g (la demi-vie du DDT dans le sol est d'environ 25 ans et il peut être un dérivé du dicofol), lindane (jusqu'à 0,5 ng/g), chlorpyrifos (jusqu'à 0,4 ng/g), PCB (jusqu'à 2,5 ng/g), PBDE (jusqu'à 0,8 ng/g).

Ces polluants persistants se retrouvent dans les fleurs à des concentrations globalement supérieures à celles enregistrées dans le sol (lindane jusqu'à 1,4 ng/g ; PCB jusqu'à 10,8 ng/g).

En conclusion, la recherche montre la présence de molécules toxiques, persistantes et interdites depuis des années dans toutes les matrices examinées : sol, fleurs et produits apicoles ; les abeilles sont la matrice présentant les concentrations les plus élevées.

- En Espagne, en juin et juillet (2017), la teneur en pesticides des abeilles ouvrières vivantes, du pollen stocké dans la ruche et de la cire a été examinée dans 45 ruchers situés dans 39 régions. Les zones ont été classées comme agricoles (avec une agriculture intensive) si plus de 50% de la superficie était consacrée à la culture et ont été classées comme rurales, urbaines ou montagneuses, à faible ou forte intensité agricole.⁵⁴ Au total, 63 pesticides ont été testés dans 133 échantillons provenant de 5 ruches sélectionnées au hasard par rucher. La cire a montré les plus fortes concentrations d'acaricides utilisés par les apiculteurs, tels que le coumaphos, le chlorfenvinphos, le fluvalinate et l'acrinathrine, qui étaient présents dans 75% des échantillons. La cire était contaminée par 8 pesticides avec une moyenne de 4,5 molécules par échantillon et jusqu'à 7 pesticides ont été trouvés simultanément (dans 6 échantillons). Le fluvalinate, le coumaphos et l'acrinathrine ont été mesurés dans 70% des échantillons. Les concentrations de fluvalinate, coumaphos, acrinathrine et chlorfenvinphos dans la cire étaient 103, 2.252, 10.168 et 13.204 fois plus élevées que dans les abeilles vivantes. Certaines molécules comme le coumaphos ne se dégradent pas avec les traitements thermiques effectués pour recycler la cire et sont stables (dans cette étude, une concentration allant jusqu'à 53.400 ng/g a été mesurée). Les concentrations d'acaricides mesurées dans la cire étaient également plus élevées que celles trouvées dans le pollen (60 fois pour l'acrinathrine et 132 fois pour le chlorfenvinphos) : la cire présente un niveau de danger plus élevé pour la santé des abeilles que le pollen.

Le pollen a été échantillonné à l'intérieur des ruches (stockées pendant l'année) et était contaminé à la fois par les insecticides utilisés sur le terrain (chlorpyrifos et acétamipride) et par les acaricides utilisés par les apiculteurs. Le plus grand nombre de pesticides a été trouvé dans le pollen. Le pollen collecté dans les ruches des zones agricoles était le plus contaminé par les insecticides. Quatorze pesticides ont été trouvés dans le pollen, dont huit provenaient de l'agriculture et six des apiculteurs (un échantillon contenait dix pesticides et un seul était exempt des résidus recherchés). Le chlorpyrifos est l'insecticide le plus fréquemment retrouvé. Dans le pollen, les acaricides utilisés par les apiculteurs étaient également les molécules les plus fréquemment retrouvées, comme le coumaphos, le fluvalinate et l'amitraz (et leurs produits de dégradation). Le pollen stocké dans la ruche peut absorber la contamination de la cire et vice versa (par exemple, les pigments liposolubles tels que les caroténoïdes présents dans le pollen colorent la cire), alors que le pollen fraîchement récolté par les abeilles ne contient pas cette contamination.

Dans les abeilles vivantes, les pesticides ont été trouvés à des concentrations plus faibles et moins fréquemment : 45 échantillons d'abeilles (34%) étaient contaminés par 7 pesticides (4 molécules maximum dans le même échantillon d'insectes vivants). Les acaricides utilisés par les

apiculteurs étaient les molécules les plus fréquemment retrouvées : coumaphos, fluvalinate et amitraz.

Des produits non autorisés contre le *Varroa*, tels que le chlorfenvinphos (organophosphate) et l'acrinathrine (pyréthroïde), ont été trouvés dans les trois matrices testées, à des concentrations qui ne pouvaient pas être le résultat de l'utilisation de ces molécules sur le terrain. D'autres molécules non autorisées en Europe, comme le dichlofenthion, le carbendazim et le fenitrothion, étaient également présentes dans le pollen et les abeilles vivantes.

En conclusion, si l'on considère les quantités, la cire est la matrice la plus contaminée et constitue, pour les abeilles, une matrice plus dangereuse que le pollen.⁵⁴ Ce dernier contient un plus grand nombre de molécules : le pollen est prélevé après avoir été stocké dans des cellules de cire et a donc également absorbé certains polluants contenus dans la cire et utilisés par les apiculteurs. Les échantillons provenant d'abeilles vivantes sont les moins contaminés.

- Une recherche menée en Pologne (publiée en 2018) a examiné la mortalité et le comportement induits par l'alimentation artificielle de groupes de 160 ouvrières avec des aliments enrichis en pesticides.⁴⁸⁵ Des abeilles ouvrières âgées de 10 jours (*Apis mellifera* de la race Carniola) ont été nourries avec un sirop de sucre (à une concentration de 2 mol/dm³). Les abeilles témoin ont été nourries uniquement d'eau et de sucre et la consommation maximale de sirop en 24 heures était d'environ 250 mm³/abeille³. Les abeilles ont été nourries avec des solutions sucrées contenant différents pesticides (un différent pour chaque groupe de 160 abeilles) : thirame (fongicide administré à la dose de 0,6 g/100 cm³ de sirop), alpha-cyperméthrine (insecticide administré à la dose de 0,04 g/100 cm³), oxychlorure de cuivre (fongicide administré à la dose de 0,35 g/100 cm³), thiaméthoxam (insecticide administré à la dose de 0,04 g/100 cm³), bentazone (herbicide), métamitron (herbicide). Le taux de mortalité dans le groupe témoin était de 1,92 abeilles par jour, soit 1,2% (l'expérience a duré au maximum 7 jours). Le taux de mortalité le plus élevé a été enregistré chez les abeilles nourries au thiaméthoxam, 57 fois plus élevé que dans le témoin (plus de 110 abeilles mortes par jour sur 160, soit 69%) : après 36 heures, elles étaient toutes mortes. Il faut remarquer que, alors que dans le témoin les abeilles ingéraient 250,1 mm³ de solution sucrée par jour, dans le cas de la solution de thiaméthoxame elles n'en ont consommé que 0,15 mm³, soit 1.667 fois moins.

Les taux de mortalité étaient également élevés pour le groupe d'abeilles nourries avec le fongicide oxychlorure de cuivre (35,15 abeilles mortes par jour, soit 22%) : après 4,5 jours, elles étaient toutes mortes ; dans le cas des abeilles nourries avec l'insecticide alpha-cyperméthrine (32,48 abeilles mortes par jour, soit 20%), elles étaient toutes mortes en 5 jours. Dans ces deux cas également, la quantité de sirop ingérée par jour était beaucoup plus faible que dans le témoin : 52 fois moins pour le fongicide inorganique (4,75 mm³/abeille/24^h) et 111 fois moins pour la solution avec l'insecticide (2,25 mm³/abeille/24^h).

Le fongicide thirame (mortalité de 5,2 abeilles par jour sur 160), l'herbicide bentazone (mortalité de 3,2 abeilles par jour sur 160) et l'herbicide métamitron (mortalité de 13 abeilles par jour sur 160) ont des taux de mortalité plus faibles (entre 2 et 8% par jour) mais restent supérieurs au témoin. Ces molécules montrent également une réduction significative de la consommation de sirop contaminé par des pesticides : entre 18 et 15 fois moins que le témoin.

Dans l'étude, on a essayé de mesurer le changement de comportement des abeilles après l'ingestion des différentes molécules, par rapport au témoin : agressivité, mobilité, toilettage (ce terme désigne le nettoyage mutuel qui peut avoir non seulement une fonction hygiénique mais aussi une fonction sociale de reconnaissance et de communication). Les changements de comportement les plus flagrants ont été enregistrés après l'ingestion de thiaméthoxam.

L'ingestion du fongicide à base de cuivre a entraîné une multiplication par 75 de la concentration de cet élément dans le corps des abeilles par rapport au témoin (concentration

maximale de cuivre de 2.103 mg/kg). Le nickel a également été trouvé à des concentrations 4,6 fois plus élevées que dans le contrôle (concentration de 3,18 mg/kg). Le groupe nourri au thiaméthoxam a montré une augmentation similaire de la concentration (3,33 mg/kg). En conclusion, les néonicotinoïdes ont généré le plus haut taux de mortalité et le plus grand changement de comportement dans cette expérience, et les fongicides à base de cuivre la plus grande accumulation de cet élément.⁴⁸⁵ Dans les vignobles de certaines régions, le cuivre est le pesticide le plus utilisé depuis plus d'un siècle. Ce métal peut se bioaccumuler dans les feuilles, le nectar et le pollen.

- Aux États-Unis, l'abeille domestique (*Apis mellifera*) est le principal pollinisateur d'au moins 0,8 million d'hectares, mais le nombre de colonies élevées diminue : en Virginie, le nombre de colonies est passé de 78.000 dans les années 1980 à 40.000 en 2018. Afin d'obtenir plus d'informations sur les causes du déclin du nombre de colonies en Virginie, la présence de pesticides a été recherchée dans 148 colonies réparties dans 48 ruchers, entre mars 2014 et juillet 2016 (recherche publiée en 2019).¹¹⁹³ Dans 288 échantillons de miel, 160 de pollen et 68 de cire, les pesticides suivants ont été recherchés : pyréthroïdes (bifenthrine, cyhalothrine, perméthrine, cyfluthrine, cyperméthrine et fluvalinate), organophosphorés (chlorpyrifos, coumaphos et coralox), organochlorés (chlorothalonil) et triazines (atrazine). La présence de 9 des 11 pesticides recherchés a été détectée dans au moins une matrice : 3% des échantillons de miel étaient contaminés, 8% des échantillons de pollen et 19% des échantillons de cire (la cyfluthrine et la perméthrine n'ont été trouvées dans aucun échantillon). Les acaricides fluvalinate et coumaphos sont les molécules les plus fréquemment retrouvées et aux plus fortes concentrations, principalement dans la cire (respectivement à des concentrations de 69.700 et 15.500 ng/g ; les DL₅₀ sont de 15.900 ng/g pour le fluvalinate et 46.300 ng/g pour le coumaphos). Ainsi, les abeilles sont exposées à des concentrations nocives d'acaricides utilisés par les apiculteurs (pour lutter contre *Varroa destructor*) : le coumaphos se retrouve dans 90% des échantillons de cire, 26% des échantillons de pollen et 7% des échantillons d'abeilles, tandis que le fluvalinate se retrouve dans 85% des échantillons de cire, 29% des échantillons de pollen et 4% des échantillons d'abeilles. Les auteurs ont indiqué que le chlorothalonil présentait les concentrations les plus élevées dans le pollen.

- En Belgique, au cours de l'année 2016-2017, une étude a recherché le glyphosate et son métabolite (acide aminométhylphosphonique ou AMPA) dans 379 ruchers d'apiculteurs non professionnels (2.997 colonies d'*Apis mellifera*). Cet herbicide a été introduit sur le marché en 1974 et en 2015, au moins 471 tonnes ont été vendues en Belgique (la principale application était la *pulvérisation* sur les feuilles).¹¹⁹⁵ Le temps de dégradation de 50% du glyphosate dans le sol est estimé entre un et 67 jours, tandis que le temps de dégradation de 90% est estimé entre 9 et 1.661 jours (dans des conditions reproduites en laboratoire, qui peuvent être plus longues dans des conditions réelles). Dans l'environnement, le métabolite AMPA est plus persistant que la molécule de départ : le temps de dégradation de 50% dans le sol est estimé entre 30 et 330 jours. La forte variation de la fourchette montre une grande marge d'incertitude.

Le glyphosate a des effets toxiques chez l'homme à de très faibles concentrations : il est tératogène, cancérigène et provoque des lésions hépatiques et rénales. Certains de ces effets peuvent également être dus à d'autres molécules présentes dans les mélanges de produits commerciaux (elles peuvent renforcer la toxicité du glyphosate).

Les abeilles produisent une matrice appelée pain d'abeille, qui se compose principalement de pollen avec lequel elles nourrissent leurs larves. Dans cette recherche, l'herbicide est recherché

dans 179 échantillons de nourriture utilisée pour les larves, 100 échantillons de cire provenant des cellules des larves et 10 échantillons de miel.¹¹⁹⁵

Les 179 échantillons de pain d'abeille ont été prélevés en septembre et octobre 2016 dans 193 ruchers (soit un total de 865 colonies) : 91% ont enregistré du glyphosate, 26% le métabolite AMPA et 7% les deux molécules. La concentration maximale était de 700 ng/g, ce qui correspond à l'absorption par les larves, en 10 jours, d'environ 84 ng de glyphosate (12 mg de pollen par jour), ce qui est inférieur à la DL₅₀ de 100 µg/abeille. L'AMPA est retrouvé à la plus forte concentration de 250 ng/g (aucune DL₅₀ n'a été estimée pour cette molécule).

32% des 100 échantillons de cire contiennent du glyphosate à une concentration maximale de 320 ng/g et 2% des 10 échantillons de miel contiennent l'herbicide à une concentration maximale de 11 ng/g (la concentration maximale autorisée pour la consommation humaine en Europe est de 50 ng/g et des concentrations atteignant 163 ng/g ont été mesurées dans la littérature). Il faut remarquer que les apiculteurs renouvellent également plus de 50% de leur cire chaque année.

Les concentrations de glyphosate révèlent la possibilité d'enregistrer des effets sublétaux tels que la réduction de la quantité de certaines protéines dans le corps de l'insecte (par exemple le bêta-carotène), la diminution de la sensibilité à la présence de sucres (ces effets sont mesurés à des expositions inférieures à 5 ng/abeille) et la modification de la composition microbienne intestinale (ces effets sont mesurés à des expositions inférieures à 0,5 µg/abeille). Une limitation de ces considérations toxicologiques est que les effets synergiques avec d'autres molécules ne sont pas évalués.

- En Chine, au cours des années 2016 et 2017, la présence de 66 pesticides a été recherchée dans 189 échantillons de pollen (prélevés par les apiculteurs) et 226 échantillons de pain d'abeille (le mélange de pollen et de miel préparé pour nourrir les larves).¹²⁰⁵ Trente-deux pesticides ont été détectés dans le pollen, dont 22 insecticides, 7 fongicides, 2 herbicides et un régulateur de croissance des insectes. Seuls 3,5% des échantillons de pollen et 3,7% des échantillons de pain d'abeille n'enregistrent aucun pesticide (parmi ceux recherchés). Les échantillons contenant plusieurs résidus en même temps sont fréquents, par exemple plus de 20% contiennent plus de six substances actives (la présence simultanée de carbendazime et de chlorpyrifos est l'une des combinaisons les plus fréquentes). Les pesticides trouvés dans les échantillons de pollen avec les fréquences les plus élevées étaient : carbendazime (76%), fluvalinate (53,4%), chlorpyrifos (51,3%), fenpropathrine (45%), bifenthrine (36%), deltaméthrine (18%), chlorbenzuron (18%), thiaméthoxame (18%), lambda-cyhalothrine (17%), fenvalerate (14%), triadimefon (14%), coumaphos (12%) et imidacloprid (11%). Dans les échantillons de pain d'abeille, 31 pesticides ont été trouvés, les plus fréquents étant le carbendazime (78%), le fluvalinate (54%), le chlorbenzuron (63%), la fenpropathrine (49%), le chlorpyrifos (35%), le coumaphos (20%), le triadimefon (16%), le fenvalerate (15%), la bifenthrine (13%), le trichlorfon (13%) et l'imidacloprid (12%). Les concentrations peuvent être très élevées : le carbendazime dans le pain d'abeille atteint 14,5 µg/g. Certaines molécules sont présentes en plus grande concentration dans le pollen (thiaméthoxam, fenpropathrine, bifenthrine et chlorpyrifos) tandis que le coumaphos et le fluvalinate (acaricides utilisés par les apiculteurs) sont enregistrés en plus grande quantité dans le pain d'abeille. Ces résultats confirment que des sources alimentaires essentielles sont empoisonnées.

- Au Brésil, en 2018, 43000 tonnes de miel ont été produites et comme dans d'autres pays du Monde il y a une diminution du nombre de colonies : au Brésil, dans la période 2013-2017, le nombre de colonies d'abeilles élevées (*Apis mellifera*) a diminué de 50% ; dans la période 2017-

2018 aux États-Unis il y a eu une diminution de 30% du nombre de colonies ; tandis que dans des États comme l'Espagne et le Portugal une diminution de 32%. Les pesticides en sont la cause principale : le Brésil est le pays qui possède le plus grand marché de pesticides au monde.¹¹⁹⁴ L'herbicide glyphosate est largement utilisé dans la culture du soja, du café, de la canne à sucre, du maïs, du coton, des agrumes (et d'autres cultures) et se retrouve donc dans les sols, l'eau et les aliments (au Brésil, au moins 173.000 tonnes ont été distribuées en 2017). Il faut rappeler qu'au Brésil, la culture du soja encourage la déforestation de sites patrimoniaux tels que la forêt amazonienne. En Europe, une concentration sûre pour le glyphosate dans le miel de 0,05 µg/g a été établie, alors qu'au Brésil, rien ne l'indique. Certaines agences (EFSA et EPA) ont indiqué une DL₅₀ de contact de plus de 100 µg/abeille pour le glyphosate. Cependant, certaines études font état d'effets sublétaux à des concentrations plus faibles, tels que des troubles de la mémoire et une altération de la capacité à retourner à la ruche. L'exposition au glyphosate a été signalée comme ayant des effets neurotoxiques et une altération des capacités cognitives chez les rats et les poissons zèbres d'eau douce. Le glyphosate est présent dans le miel brésilien : 38% des 40 échantillons de miel provenant de 23 sites différents ont enregistré la présence de cet herbicide. Le métabolite (AMPA) a été trouvé dans un seul échantillon et six échantillons ont montré des concentrations de glyphosate bien supérieures au seuil de sécurité européen (0,05 µg/g). Les auteurs soulignent que d'autres études confirment la présence de l'herbicide dans le miel : le glyphosate est détecté dans 59% de 69 échantillons de miel aux États-Unis, 98% de 200 échantillons de miel au Canada et 94% de 16 échantillons de miel en Suisse.

- En Grèce, au cours des années 2014 - 2018, une surveillance a été menée dans les ruchers où des taux de mortalité élevés (supérieurs à 50%) ont été enregistrés.¹²⁰⁴ Les abeilles mortes ont été échantillonnées à proximité des ruches. 70 pesticides ont été recherchés dans 320 échantillons d'abeilles mortes, qui ont été trouvés à une concentration maximale de 166,5 µg/g. Les molécules trouvées avec les fréquences les plus élevées sont la clothianidine (20,1%), le coumaphos (12,1%) et l'imidaclopride (9,1%). Les autres molécules enregistrées sont les néonicotinoïdes tels que le thiaméthoxame (3,3%), l'acétamipride (2,9%) et le thiaclopride (2,4%), et les organophosphorés tels que le diméthoate (4,1%), chlorpyrifos éthyl (3,3%), pyréthoïdes tels que le tau-fluvalinate (2,3%), cyperméthrine (2%), λ-cyhalothrine (1,3%), deltaméthrine (1%), acrinathrine (1%), etofenprox (0,7%) et cylfuthrine (0,3%). De nombreux métabolites tels que l'imidaclopride-oléfine, l'imidaclopride-urée, le 5-hydroxy imidaclopride, l'acide 6-chloronicotinique (6-CNA), le chlorpyrifos oxon, le coumaphos oxon, l'acétamipride-N-desméthyl, le prothioconazole dextio, les métabolites du fenthion, de l'amitraz (DMF, DMPF, DMA) et du fipronil sont également présents chez les abeilles. Certains métabolites comme ceux des néonicotinoïdes se retrouvent à des concentrations supérieures à la DL₅₀ et il faut remarquer que certains dérivés peuvent avoir des effets négatifs plus importants que les molécules de départ, comme l'action inhibitrice de l'acétylcholinestérase du chlorpyrifos oxon. Sept molécules sont également présentes dans les abeilles en même temps (difénoconazole, clothianidine, imidaclopride, carbendazime, trifloxystrobine, tébuconazole, pyriméthanile), ce qui peut générer des effets additifs et synergiques très dangereux (les autres mélanges dans les échantillons individuels étaient : coumaphos, imidaclopride, chlorpyrifos éthyl ; clothianidine, chlorpyrifos éthyl, DMF, DMPF). Parmi les molécules présentes à des concentrations élevées dans les abeilles mortes figurent la cyperméthrine (jusqu'à 260 fois la DL₅₀, c'est-à-dire la dose qui, par ingestion ou contact, tue 50% des individus exposés en moins de 48 ou 72 heures), l'imidaclopride (jusqu'à 186 fois la DL₅₀), un métabolite de l'imidaclopride (l'oléfine de l'imidaclopride), le diméthoate (jusqu'à 123 fois la DL₅₀ ; cette molécule est utilisée en oléiculture et contamine les fleurs sauvages), méthomyl (jusqu'à 104 fois la DL₅₀), deltaméthrine (jusqu'à 55 fois la DL₅₀), chlorpyrifos éthyl (jusqu'à 29 fois la DL₅₀), malathion (jusqu'à 6 fois la

DL₅₀), clothianidine (jusqu'à 5 fois la DL₅₀), thiaméthoxam (jusqu'à 2,5 fois la DL₅₀), λ-cyhalothrin (jusqu'à 2,4 fois la DL₅₀).

Dans 184 échantillons d'abeilles mortes (sur un total de 320), la présence du champignon parasite *Nosema* et de l'acarien *Varroa* a été recherchée : 27% ont montré la présence du champignon et 22,2% de l'acarien. 29,3% des échantillons d'abeilles mortes sont simultanément exposés à des pesticides et à des parasites (*Nosema* et/ou *Varroa*). Ces synergies affaiblissent les colonies et compromettent davantage leur capacité de survie. Les résultats de cette étude confirment la principale cause de la mort des abeilles : les pesticides.

- En Espagne, au cours des années 2016 - 2018, trois ruchers ont été suivis, dont deux étaient situés près de zones de culture intensive (principalement des agrumes), et un troisième dans des zones semi-naturelles avec quelques plantations d'oliviers et d'autres cultures.¹²¹⁹ Au cours de ces deux années, la mortalité a été suivie et 38 échantillons d'abeilles vivantes, 17 échantillons d'abeilles mortes (ceux-ci sont collectés lorsqu'il y a une augmentation du taux de mortalité naturelle, que l'on considère comme étant d'environ 20 abeilles mortes par jour à proximité de la colonie), 33 échantillons de pain d'abeille (un mélange de pollen et de miel préparé par les abeilles ouvrières pour les larves) et trois échantillons de cire prélevés au début du suivi (juin 2016) ont été collectés. La cire s'est avérée fortement contaminée par le coumaphos (jusqu'à 5.085 ng/g) et le chlorfenvinphos (jusqu'à 320 ng/g). Ces composés n'ont pas été utilisés pendant l'étude et sont donc dérivés de cire recyclée, ce qui suggère une utilisation illégale. L'acaricide amitraz a été utilisé pendant la surveillance et son métabolite (DMF) a été trouvé uniquement dans le rucher de la zone semi-naturelle à une concentration maximale de 190 ng/g.

Dans les 33 échantillons de nourriture larvaire, 17 pesticides avec des pics de 8 molécules présentes en même temps sont enregistrés : dans les deux ruchers situés dans la zone d'agriculture intensive. Les abeilles sont donc exposées à des mélanges complexes et dangereux dès les premiers stades de leur développement. Dans les échantillons prélevés dans ces deux ruchers, une moyenne de 5 pesticides a été trouvée tandis que dans le troisième, une moyenne de 3 pesticides a été trouvée (situé dans la zone semi-naturelle). Globalement, le pain d'abeille collecté auprès des colonies situées dans les deux zones d'agriculture intensive est au moins 6 ou 7 fois plus toxique que celui provenant du rucher situé dans la zone semi-naturelle. Certains pesticides sont enregistrés à des concentrations élevées dans le pain d'abeille : jusqu'à 34 ng/g de diméthoate (trouvé dans 25% des échantillons), jusqu'à 28 ng/g de méthiocarbe (trouvé dans 9% des échantillons), jusqu'à 167 ng/g de chlorpyrifos (trouvé dans 45% des échantillons), jusqu'à 40 ng/g d'acrinathrine. L'amitraz a été détecté dans 97% des échantillons de pain d'abeille et le coumaphos dans 94%.¹²¹⁹ Des concentrations dangereuses d'acaricides utilisés par les apiculteurs mais aussi de pesticides utilisés en agriculture (par exemple des insecticides tels que le diméthoate, l'imidaclopride dans 12% des échantillons, ou des fongicides tels que le carbendazime dans 30% des échantillons et le tébuconazole dans 6% des échantillons) sont trouvés dans la nourriture des jeunes abeilles.

Les ruchers situés dans les zones d'agriculture intensive sont plus contaminés et des signes d'intoxication des abeilles ont effectivement été observés dans ceux-ci mais pas dans celui situé dans la zone semi-naturelle (trois pics de mortalité entre 160 et 256 abeilles mortes par jour dans un rucher et deux pics dans l'autre). Les abeilles mortes étaient contaminées par le diméthoate (76,5% des échantillons à des concentrations supérieures à 338 ng/g) et son métabolite (ométhoate), le chlorpyrifos (dans 41,2% des échantillons à des concentrations supérieures à 2.700 ng/g), le fluvalinate (35,3% des échantillons), l'imidaclopride (11,8% des échantillons, soit deux échantillons avec 22 et 476 ng/g), le métabolite de l'amitraz (5,9% des échantillons),

l'hexythiazox (17,6%), le coumaphos (5,9%), le pyriproxifène (11,8%) et l'acétamipride (11,8%).

Certaines molécules sont retrouvées dans les abeilles mortes mais pas dans les vivantes : hexythiazox (concentration maximale de 266 ng/g d'abeilles mortes), pyriproxifen (concentration maximale de 558 ng/g), imidacloprid (concentration maximale de 476 ng/g), acetamiprid (concentration maximale de 14 ng/g). L'utilisation des néonicotinoïdes est interdite, les concentrations trouvées suggèrent donc une utilisation illégale dans l'agriculture. Il faut savoir que ces molécules sont capables de produire des effets négatifs à des doses de quelques milliardièmes de gramme par abeille, c'est-à-dire à des concentrations au moins 100 fois inférieures à celles trouvées dans les abeilles mortes.

Les pesticides trouvés dans les ruchers suffisent à expliquer l'augmentation des taux de mortalité, et parmi les molécules les plus incriminées, les auteurs mettent en avant le diméthoate et le chlorpyrifos, deux insecticides oranophosphorés (le premier dans les abeilles mortes était présent à une concentration maximale plus de 10 fois supérieure à celle des abeilles vivantes, le second 122 fois) et les néonicotinoïdes comme l'imidaclopride. En conclusion, cette étude confirme une forte contamination de la cire par les apiculteurs et l'utilisation illégale de pesticides tant par les agriculteurs que par les apiculteurs.

- En Croatie, la production de miel biologique correspond à environ 0,4% de la production totale (entre 7 et 8 tonnes par an), bien qu'elle permette de meilleurs revenus. Des recherches ont comparé les concentrations de divers polluants, tels que des métaux, des pesticides, des biphényles polychlorés et des antibiotiques (sulfamides streptomycine et dihydrostreptomycine), dans des échantillons de miel biologique et conventionnel de même origine botanique. Entre 2018 et 2019, 61 échantillons de miel ont été examinés, dont 16 issus de l'agriculture biologique.

¹¹⁹⁷ Certains résultats peuvent être résumés comme suit :

- Une présence plus élevée de chrome est détectée dans le miel de châtaignier biologique que dans le miel conventionnel. Les échantillons de miel biologique multifloral présentaient des concentrations plus élevées de manganèse et de nickel que le miel conventionnel (bien que les différences ne soient pas significatives).
- On ne trouve aucun des antibiotiques et des polychlorobiphényles recherchés.
- Sur les 121 pesticides recherchés, seuls l'amitraz (et ses métabolites comme le DMF), le formamide et le coumaphos ont été trouvés. En Croatie, l'utilisation des acaricides suivants par les apiculteurs conventionnels est autorisée : amitraz (formamidine), coumaphos (organophosphate) ou fluméthrine (pyréthroïdes). L'amitraz et/ou le coumaphos ont été trouvés à des concentrations inférieures aux niveaux maximaux autorisés dans le miel conventionnel (0,2 et 0,1 mg/kg, respectivement) dans 2 des 16 échantillons de miel biologique et dans 34 des 45 échantillons de miel conventionnel. Le coumaphos est plus susceptible d'être trouvé que l'amitraz car il a une plus longue persistance et parce que les apiculteurs l'utilisent probablement plus souvent, mais il ne devrait pas être présent dans le miel biologique.

En résumé, il a été constaté que le miel d'origine biologique était beaucoup moins contaminé par les acaricides que le miel issu de la production conventionnelle : le miel d'origine biologique enregistre moins fréquemment et à des concentrations plus faibles les ingrédients actifs, mais il est tout de même empoisonné.

L'utilisation de pesticides et la production agricole intensive en général ont nui aux abeilles, mais pas seulement. En moins de 60 ans, l'agriculture chimique a entraîné l'extinction d'animaux et de plantes et altéré la capacité des écosystèmes à fournir des services essentiels.

L'utilisation massive et constante de poisons artificiels tels que les insecticides, les herbicides et les fongicides a réduit la biodiversité. L'utilisation de pesticides a accru la dépendance de l'agriculture intensive à l'égard de ces poisons, car elle a réduit la capacité des écosystèmes à assurer un contrôle naturel des agents pathogènes des plantes. En Europe, les zones agricoles occupent au moins 43% de la surface terrestre, ce qui en fait la principale zone de refuge pour les espèces sauvages : au moins 50% de la biodiversité des oiseaux. En Allemagne et en Angleterre, 20 à 30% de la flore sauvage se trouve dans les zones agricoles.

Au fil du temps, la culture industrielle, telle que la culture des céréales, a augmenté les rendements par unité de surface mais a détérioré les chances de survie des plantes et des oiseaux sauvages : il existe une corrélation inverse avérée entre les rendements céréaliers et le nombre d'espèces qui se nichent sur les terres.¹¹⁹⁸ D'autre part, avec l'augmentation des rendements céréaliers, la capacité de survie des ravageurs tels que les pucerons a augmenté, leurs ennemis naturels ne pouvant plus assurer leur fonction de contrôle biologique. La présence d'oiseaux insectivores diminue à mesure que l'utilisation d'insecticides ou de fongicides augmente.⁴³³ Par conséquent, la fréquence de la prédation des insectes pathogènes tels que les pucerons par les oiseaux insectivores diminue avec l'utilisation de pesticides. L'application des principes de l'agriculture biologique, c'est-à-dire la non-utilisation de pesticides, peut contribuer à accroître la biodiversité utile aux agriculteurs, comme celle des plantes sauvages et des pollinisateurs. Malheureusement, des mesures telles que la diffusion d'une agriculture sans pesticides n'ont pas d'effet positif significatif sur la biodiversité des animaux qui se déplacent sur de longues distances (par exemple, les oiseaux, les papillons), car ils sont affectés par les polluants et les changements produits ailleurs.¹¹⁹⁸

ENQUÊTES SUR LES PESTICIDES ET AUTRES MOLECULES COMME LES PCB (bisphényles polychlorés) MENÉES EN ITALIE

Dans le but de mettre en évidence les dangers générés par l'utilisation extensive et massive des pesticides, les résultats de divers exercices de surveillance menés en Italie sont rapportés. Ces résultats révèlent également une contamination élevée et généralisée des produits apicoles. Les abeilles sont systématiquement exposées par les apiculteurs et les agriculteurs à des centaines de molécules dangereuses.

- Il est intéressant de résumer certains résultats d'une enquête menée dans 34 provinces italiennes à l'aide de 400 stations de surveillance.¹⁷ Entre 1983 et 1986, 581 échantillons d'abeilles mortes ont été analysés. 76% (442 sur 581) des échantillons d'abeilles mortes étaient positifs pour les ingrédients actifs suivants :

- Dithiocarbamates (mancozèbe, manèbe, métirame, zinèbe, zirame) : 70,8%.
- Diméthoate : 15,3%.
- Parathion : 14,7%.
- Azinphos-méthyle : 11,9%.
- Carbaryl : 11%.
- Méthyl parathion : 10,4%.
- Endosulfan : 7,2%.
- Ométhoate : 7,2%.
- Méthamidophos : 2,4%.

Il y a plus de 30 ans, les signes d'exposition des abeilles à des substances très dangereuses étaient déjà évidents.

- Un contrôle effectué dans la province de Ferrara (pendant deux ans : 1987-1988) a confirmé que les molécules les plus utilisées par les agriculteurs sont celles que l'on retrouve le plus fréquemment dans les abeilles mortes.¹⁷ Cette étude confirme l'utilité et l'efficacité des abeilles comme bio-indicateurs.

- Une enquête menée en Émilie-Romagne en 1998, à l'aide de 13 stations de biosurveillance (chacune étant composée de deux ruches), a enregistré 47 événements d'augmentation anormale de la mortalité et, sur les 47 échantillons d'abeilles analysés, 38 (80,9%) ont enregistré la présence d'au moins un pesticide.¹⁷ Des ingrédients actifs utilisés contre les pucerons tels que le diméthoate et l'ométhoate ont été trouvés, ainsi que le fénitrothion, le méthyl parathion, le méthamidophos, le méthidathion et le fénoxycarbe (dont l'utilisation est interdite en Italie depuis 1995). Le pollen trouvé dans les abeilles mortes a permis de retracer les cultures visitées et de savoir si des traitements avaient été effectués pendant la floraison.

- Une biosurveillance menée en Italie en 2008-2010 (pendant trois ans) a permis d'étudier la contamination par les pesticides dans 10 réserves naturelles de la région des Marches.³³ Vingt-deux colonies d'abeilles ont été utilisées dans 11 stations à partir desquelles du miel, des abeilles vivantes (100 abeilles pour chaque échantillon) et des abeilles mortes ont été échantillonnées au cours des mois de mai à octobre. Les abeilles mortes ont été collectées à l'aide de pièges spéciaux placés dans la ruche. Les échantillons ne contenaient pas les pesticides détectés (30 organophosphates, 13 pyréthroïdes et 16 triazoles).

- En Italie, la biosurveillance a été réalisée à partir de 130 ruchers (avec plus de 10 ruches chacun) répartis sur l'ensemble du territoire national (des ruchers fixes ont été utilisés).¹⁶³ Celle-ci a été effectuée en 2009 et 2010. Chaque colonie a été échantillonnée quatre fois par an : à la fin de l'hiver, entre le printemps et l'été, à la fin de l'été et en automne. Des échantillons composés de 50 insectes vivants, du mélange de pollen et de miel utilisé pour nourrir les larves et de morceaux de cire (5 cm x 5 cm) ont été examinés. 1.500 échantillons ont été prélevés par an et 128 composés chimiques ont été recherchés (chromatographie liquide avec spectrométrie de masse et chromatographie gazeuse avec détecteurs à capture d'électrons ont été utilisés).¹⁶³ La cire était la matrice la plus contaminée : 40% des échantillons contenaient des pesticides et 12,7% avaient plus d'un résidu (au maximum 4 résidus de pesticides ont été trouvés). Des pesticides ont été trouvés dans 12% des échantillons de miel. Une enquête ultérieure (2012) sur les miels italiens a révélé la présence de néonicotinoïdes dans 15% des échantillons de miel analysés.³⁵

Pour en revenir au suivi national (2009/2010), 25 molécules différentes ont été trouvées dans le mélange préparé par les abeilles pour nourrir les larves (il est composé de pollen et de miel), 21 principes actifs dans le miel et 17 dans la cire.¹⁶³ Les pesticides les plus fréquemment retrouvés sont les organo-phosphorés et les pyréthroïdes ; dans la cire, le coumaphos et le tau-fluvalinate. Ces molécules sont utilisées par les apiculteurs contre le *Varroa* (acarien parasite). Le coumaphos est la molécule dont la concentration est la plus élevée dans la cire : 12.779 ng/g. D'autres molécules retrouvées en forte concentration dans la ruche sont le propamocarbe (fongicide) et la fluméthrine (452 ng/g dans le miel). Des molécules interdites sont également trouvées (chlorfenvinphos et roténone ; cette dernière a été trouvée dans 35% des échantillons de miel en 2009).

L'analyse des risques révèle que les molécules présentant les concentrations les plus préoccupantes (dépassant la DL_{50}) sont les néonicotinoïdes (imidaclopride, thiaméthoxam, clothianidine) et le fipronil. L'imidaclopride et le clothianidine se retrouvent à des concentrations élevées dans les abeilles vivantes et le thiaméthoxame dans la nourriture des larves. Certains insecticides sont également présents dans le miel.

En 2009/2010, la mortalité des colonies d'abeilles était de 19% (en 2007, elle était de 30 à 40% en Italie du Nord et de 10 à 30% en Italie centrale et du Sud). Les taux de mortalité dans les différentes régions d'Italie étaient variables, allant de 0 à 34%. Comme on pouvait s'y attendre, une relation positive entre les résidus de pesticides trouvés dans les insectes adultes et la mortalité est évidente. Ce travail confirme la corrélation entre la mortalité des colonies d'abeilles et le pourcentage de terres agricoles à proximité des ruches.

- L'examen de la présence de 61 contaminants organiques dans 47 échantillons de miel sicilien et calabrais, collectés dans les années 2012-2013, a enregistré la présence de pesticides organophosphorés dans 100% des échantillons et de pesticides organochlorés, de pyréthroïdes et d'autres molécules dangereuses (par exemple, des régulateurs de croissance des insectes) dans 53,2% des échantillons. ²⁹ Des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) ont été trouvés dans 46,8% des échantillons de miel.

Les échantillons de miel ont été prélevés directement chez les apiculteurs, qui ont assuré n'avoir effectué aucun traitement dans les six mois précédant la récolte du miel. Chaque échantillon était composé de 500 g de miel provenant de différentes combinaisons florales : 21 échantillons de fleurs sauvages, 6 miels de châtaignier, 6 miels d'agrumes, 3 de sulla, 3 de miellat de fleurs sauvages, 3 d'acacia, 2 d'eucalyptus, 1 de thym, 1 de châtaignier et d'eucalyptus et 1 de fleur sauvage.

Tous les échantillons sont contaminés par une ou plusieurs des molécules recherchées. 46,8% des échantillons (22 sur 47, dont 21 échantillons de miel sicilien et un de Calabre) ont montré des concentrations dépassant les limites maximales autorisées en Europe pour le chlorfenvinphos (il a cependant été trouvé dans les 47 échantillons), le tebuconazole, le coumaphos, le t-fluvalinate, le phosphate de triphényle (ou TPP), le lindane (ou γ -hexachlorocyclohexane ou gamma-HCH). En détail : 22,7% des échantillons ont montré des concentrations supérieures aux limites maximales réglementaires pour le phosphate de triphényle (ou TPP), 4,5% pour le tébuconazole, le coumaphos, le t-fluvalinate et le lindane. Les autres résultats sont résumés :

- Parmi les organophosphorés, le coumaphos a été trouvé dans 98% des échantillons, le phosphate de triphényle (ou TPP) dans 85% des échantillons, le diazinon dans 30% des échantillons, le phosmet dans 23% des échantillons, le chlorpyrifos-éthyl dans 2% des échantillons.
- Parmi les pesticides organochlorés, le 4,4'-DDT a été trouvé dans 23% des échantillons, le lindane dans 19% des échantillons, le 2,4'-DDT dans 13% des échantillons, l'endosulfan II dans 13% des échantillons.
- Parmi les hydrocarbures aromatiques polycycliques, le phénanthrène a été trouvé dans 34% des échantillons de miel, le fluorène dans 26% des échantillons, le pyrène dans 11% des échantillons et l'acénaphthalène dans 2% des échantillons.

Le butoxyde de pipéronyle a également été trouvé dans 28% des échantillons, le tébuconazole dans 11% des échantillons, le flusilazole et le pyriproxyfen dans 6% des échantillons.

Les auteurs de la publication soulignent que le chlorfenvinphos, que l'on retrouve dans les 47 échantillons, pourrait être accumulé dans la cire, qui est recyclée et peut transférer une partie de ses ingrédients actifs au miel.

Cette recherche démontre l'utilisation de pesticides en grande quantité et l'utilisation de principes actifs interdits qui se retrouvent dans le miel à des concentrations dangereuses pour les abeilles mais aussi pour les consommateurs.

- Une recherche menée en Italie (dans 11 régions), en 2012-2014 (trois ans), a étudié la présence de pesticides dans le pollen de 53 ruchers, chacun composé de 5 colonies, dont 65% produisaient du miel certifié biologique (les échantillons ont été collectés entre mars et septembre).³² Le pollen était collecté sur les insectes retournant à la ruche à l'aide de systèmes mécaniques spéciaux. Le pollen est un aliment très important pour les stades juvéniles (c'est une source de protéines), sa contamination risque donc d'empoisonner dangereusement la nouvelle génération (ils mangent même plus de 9,5 mg/abeille/jour). Parmi les 66 molécules recherchées, 10 fongicides et 8 insecticides ont été trouvés. Au total, 554 échantillons de pollen ont été analysés et 62% d'entre eux contenaient au moins un pesticide. Dans 38% des échantillons, plus d'un résidu a été détecté : dans 1% des échantillons, jusqu'à 7 molécules ont été détectées en même temps ; 24% n'ont détecté qu'une seule molécule parmi celles recherchées.

Treize pour cent des échantillons de pollen présentaient des concentrations de pesticides considérées comme dangereuses pour les abeilles et 39% des échantillons présentaient des concentrations considérées comme dangereuses pour la santé humaine par la législation européenne (*acceptable daily intake* ou *maximum residue limit*). Parmi les molécules retrouvées à des concentrations supérieures à celles considérées comme non dangereuses pour l'homme figurent : l'azoxystrobine, le bénomyl, le boscalid, le chlorfenvinphos, le chlorpyrifos, le diméthoate, le mandipropamid, le métalaxyl, le phenthoate et le tébuconazole. Les ingrédients actifs les plus fréquemment trouvés étaient :

- l'insecticide chlorpyrifos (dans 30% des échantillons et avec la plus forte concentration de 179 µg/kg enregistrée dans le Piémont) ;
- le fongicide mandipropramide (dans 19% des échantillons, avec la concentration la plus élevée de 261 µg/kg) ;
- le fongicide métalaxyl (dans 16% des échantillons et avec la concentration la plus élevée de 2.463 µg/kg) ;
- le fongicide spiroxamine (15%) ;
- l'insecticide néonicotinoïde imidaclopride (12%).

17% des échantillons de pollen contiennent des néonicotinoïdes, qui sont très dangereux pour la santé des abeilles. Ces molécules sont persistantes dans le sol et peuvent également se retrouver dans l'eau. À partir des concentrations de pesticides mesurées dans le pollen, il est possible de prévoir une augmentation de 50% de la mortalité en 10 jours.

L'insecticide chlorpyrifos est également le plus fréquemment retrouvé car il est commercialisé en grande quantité dans plus de 100 pays et, en Italie, il était vendu dans au moins 115 produits. D'autres contrôles l'ont trouvé dans 100% des échantillons de pollen dans le Val d'Aoste et en Sicile.³² Dans les Pouilles, le chlorpyrifos a été associé, avec le diméthoate, à la mort de colonies due aux traitements des vignobles, tandis que dans la province de Bolzano, le chlorpyrifos a été associé à la mort de colonies près de vergers de pommiers. Malheureusement, on le trouve aussi facilement dans les miels certifiés biologiques.

Huit pesticides systémiques (6 fongicides et 2 néonicotinoïdes non autorisés : imidaclopride et thiaméthoxame) ont été trouvés dans 36% des échantillons. On trouve également des pesticides interdits en Italie, comme le phenthoate, interdit depuis 2003 (17 échantillons positifs au Piémont, en Vénétie, en Émilie-Romagne et en Toscane), le carbaryl, insecticide à base de carbamate interdit depuis 2012 (un échantillon positif au Piémont), le chlorfenvinphos, insecticide organophosphoré interdit depuis 2006 (25 échantillons positifs au Piémont, en Lombardie et en

Vénétie). Il est intéressant de remarquer qu'aucun pesticide n'a été trouvé dans le pollen collecté en septembre.

En conclusion, même les systèmes apicoles qui devraient être plus attentifs à la contamination chimique, comme ceux qui appliquent les spécifications de la certification biologique, sont pollués par des substances dangereuses et interdites. Les auteurs soulignent un point critique : les ruches utilisées pour la production de miel certifié biologique peuvent être placées à proximité de cultures qui utilisent des produits dangereux, lorsque les plantes ne sont pas en fleurs ou si elles ne sont pas considérées comme pertinentes du point de vue de la pollinisation.

- En Italie, la présence d'acaricides a été suivie pendant 10 ans (2005-2014) dans 1.319 échantillons de cire.¹²⁰⁸ Les ingrédients actifs les plus fréquemment trouvés étaient : coumaphos (49%), fluvalinate (38%), chlorfenvinphos (25%), 2,4-diméthylphénylformamide (DMPF, un métabolite de l'amitraz ; 6%). Cette contamination met en évidence l'utilisation généralisée par les apiculteurs de pesticides pour lutter contre l'acarien *Varroa destructor*. Les acaricides sont lipophiles et ne se dégradent pas facilement, ils s'accumulent donc dans la cire. L'utilisation d'acaricides est répandue depuis au moins 30 ans, de sorte que même dans l'agriculture biologique, il est difficile de trouver de la cire recyclée sans ces substances. Pour cette raison, un compromis a été accepté pour tolérer des concentrations élevées dans la cire d'abeille biologique : 0,2 mg/kg pour le coumaphos, 0,1 mg/kg pour le fluvalinate, 0,01 mg/kg pour le chlorfenvinphos ; pour le métabolite de l'amitraz (DMPF) et le cymiazole, les concentrations maximales admissibles sont incluses dans la limite de tolérance générale de 0,3 mg/kg pour tous les résidus de pesticides. Le cymazole n'est jamais retrouvé dans cette étude et il faut savoir que, comme le coumaphos, il est interdit depuis 2009.

Comme le montre le tableau ci-dessous, 64% des 1.319 échantillons de cire ont montré la présence d'au moins un des acaricides recherchés et, en 2014, 91% des échantillons étaient contaminés. Certaines années, les concentrations moyennes étaient supérieures au seuil de tolérance fixé par la réglementation de l'apiculture biologique : en 2006, 2010 et 2014 ; avec des pics de concentration, en 2014, de 8,9 mg/kg pour le coumaphos (molécule interdite mais retrouvée dans 75% des échantillons de 2014), 0,4 mg/kg pour le fluvalinate et 3,9 mg/kg pour le chlorfenvinphos (cette matière active n'a jamais été autorisée en apiculture : elle est 50 fois plus toxique que le coumaphos). Ces recherches confirment la suspicion d'un comportement illégal de la part de certains apiculteurs, et les concentrations des acaricides recherchés sont élevées et donc très dangereuses.

Résultats d'analyse

Année - Échantillons positifs (%) - Nombre d'échantillons ¹²⁰⁸		
2005	69	217
2006	70	217
2007	55	186
2008	56	162
2009	32	59
2010	47	139
2011	54	97
2012	37	87
2013	56	50
2014	91	105
Total	64	1.319

- Des recherches menées entre 2013 et 2015 ont examiné la contamination de la cire par les pesticides.^{55, 70} Il est d'usage chez les apiculteurs de recycler la cire d'abeille ; cette pratique favorise l'accumulation de molécules hydrophobes, résistantes à la fusion, aux hautes températures et persistantes, comme certains acaricides. Peu d'informations sont disponibles sur la présence de pesticides dans la cire en Italie. Au total, 247 pesticides ont été recherchés dans 178 échantillons de cire d'abeille. Les échantillons étaient constitués de 10 g de cire d'abeille prélevés au hasard dans 60 ruchers situés dans différentes régions italiennes pendant trois ans : 40% des échantillons ont été collectés en Toscane, 14% dans le Piémont, 9,5% en Lombardie et 9,5% en Émilie-Romagne. 73,6% des échantillons étaient contaminés par au moins une molécule parmi celles recherchées et 15,7% de ces échantillons positifs contenaient des pesticides à des concentrations supérieures à 0,2 mg/kg, ce qui est la limite pour la cire d'abeille issue de l'apiculture biologique. Seuls 26,4% des échantillons de cire étaient exempts des substances recherchées. Sur les 247 molécules analysées, 41 ont été trouvées : jusqu'à 14 molécules ont été détectées en même temps et des molécules interdites en Italie et en Europe, comme le DDT et ses métabolites, et le coumaphos, sont également enregistrées. Le coumaphos est un insecticide/acaricide organophosphoré présent dans 60,7% des échantillons (jusqu'à 0,99 mg/kg). Il est utilisé en médecine vétérinaire pour lutter contre les ectoparasites, notamment en l'ajoutant à l'alimentation des bovins et des poulets pour réduire la croissance des larves de mouches dans les fèces ; en Italie, l'utilisation de cet insecticide en médecine vétérinaire est interdite depuis 2009. On y trouve également du lindane et de l'heptachlore, qui sont interdits depuis des années. Les autres molécules trouvées sont le butoxyde de pipéronyle, le tau-fluvalinate (trouvé dans 50% des échantillons) et la roténone (un composé interdit en agriculture et apiculture biologiques en raison de sa toxicité pour les abeilles).

Les molécules les plus fréquemment trouvées sont des acaricides tels que le coumaphos (comme déjà mentionné, enregistré dans 60,7% des échantillons), le tau-fluvalinate (pyréthroïde enregistré dans 50% des échantillons) et le chlorfenvinphos (insecticide organophosphoré enregistré dans 35,4% des échantillons). Dans 16 échantillons, le tau-fluvalinate a été détecté à des concentrations supérieures à 0,1 mg/kg, qui est le résidu maximal tolérable dans la cire d'abeille issue de l'agriculture biologique (il a été enregistré à une concentration maximale de 1,07 mg/kg). Le chlorfenvinphos a été détecté à des concentrations allant jusqu'à 0,61 mg/kg, bien que la limite maximale autorisée en agriculture biologique soit de 0,01 mg/kg. Les concentrations les plus élevées ont été enregistrées pour les pyréthrines (jusqu'à 4,42 mg/kg) et le butoxyde de pipéronyle (jusqu'à 2,3 mg/kg). L'amitraz est une molécule autorisée en Italie pour les traitements anti-varroa (la limite maximale autorisée dans le miel est de 200 ng/g) et, en quelques heures, elle se transforme en d'autres molécules (métabolites) qui sont persistantes et résistent au processus thermique appliqué pour recycler la cire. À cet égard, il est utile de mentionner que des variétés de *Varroa* résistantes à l'amitraz ont été enregistrées en Italie.⁵⁵

En conclusion, on retrouve également des molécules interdites depuis des décennies, comme le DDT dans 24 échantillons (et ses métabolites avec une concentration maximale de 0,43 mg/kg), le lindane et l'heptachlore : les concentrations enregistrées suggèrent une utilisation illégale.

- En Italie, en 2015, la présence de pesticides, de PCB (polychlorobiphényles), d'éthers diphenyliques polybromés et de PBDE a été contrôlée dans 59 échantillons de miel biologique.⁵⁸ Les échantillons de miel ont été prélevés dans des ruchers situés dans trois régions : Calabre (14 échantillons provenant d'agrumes), Trentino Alto Adige (18 échantillons provenant de la culture de pommes), Lombardie (27 échantillons de miel multifloral provenant d'une zone industrielle). Les échantillons de miel (2 g chacun) ont été analysés à l'aide d'un spectromètre de masse triple-quadrupole et d'un chromatographe en phase gazeuse. Les molécules les plus fréquemment retrouvées dans les échantillons de miel biologique provenant de la culture de

pommes ou d'agrumes étaient le diazinon, le mevinphos, le coumaphos, le chlorpyrifos et le quinoxyfen. Les échantillons provenant de différentes zones agricoles contiennent différents pesticides, ce qui confirme que le miel peut être utilisé pour obtenir des informations sur les molécules utilisées par les agriculteurs.

Les pesticides organochlorés et les organophosphorés (ils bloquent l'acétylcholinestérase) sont persistants, stables, peu volatils et lipophiles, de sorte qu'ils peuvent facilement se bioaccumuler dans la chaîne alimentaire.⁵⁸

Cinquante pour cent des échantillons de miel d'agrumes biologiques de Calabre ont révélé la présence d'eldrin, à des concentrations comprises entre 1,95 et 18,9 ng/g. Dans un échantillon, la concentration était supérieure à la limite maximale autorisée (Règlement CE n° 396/2005).⁵⁵ Le diazinon a été trouvé dans 64% des échantillons à une concentration maximale de 1,14 ng/g, et le mevinphos a été trouvé dans 86% des échantillons.⁵⁸

Dans le miel biologique obtenu près des vergers de pommiers dans le Trentin, l'aldrine a été trouvée dans 5% des échantillons à une concentration maximale de 1.174 ng/g, l'eldrine dans 44% des échantillons à une concentration maximale de 13.343 ng/g (la dieldrine et les métabolites de l'aldrine sont présents). L'heptachlore, le DDT et ses métabolites (ppDDE) sont également retrouvés dans 17% des échantillons, à une concentration maximale de 0,09 ng/g pour le DDT et de 1,47 ng/g pour le ppDDE. Dans le miel des vergers de pommiers, 12 organophosphorés différents sont présents, comme le quinoxyfen, qui a été trouvé dans 100% des échantillons à des concentrations comprises entre 3,09 et 4,23 ng/g. Le diazinon est également présent dans 100% des échantillons, à des concentrations comprises entre 1,13 et 1,15 ng/g, tandis que le mevinphos est présent dans 67% des échantillons.

Dans le miel biologique produit en Lombardie, le ppDDT et ses métabolites ppDD et ppDDE ont été trouvés à des concentrations allant jusqu'à 1,99 ng/g et à des fréquences de 41%, 22% et 33% respectivement. L'heptachlore a été détecté dans 11% des échantillons, à une concentration maximale de 1,19 ng/g, la dieldrine a été trouvée dans 41% des échantillons à une concentration maximale de 2,93 ng/g. Le fongicide captan a également été enregistré dans 37% des échantillons avec une concentration maximale de 20,56 ng/g.

Le chlorpyrifos est trouvé dans les échantillons des trois régions avec la plus grande fréquence d'occurrence dans le miel biologique de Calabre (29%) et à la plus grande concentration (389,5 ng/g).

Bien que ces miels soient d'origine biologique, dans les échantillons de miel de Calabre, l'acaricide coumaphos a été trouvé dans 78% des échantillons et dans ceux du Trentin dans 79% des échantillons, à une concentration maximale de 2,06 ng/g.⁵⁸

Les retardateurs de flamme bromés (comme les éthers diphenyliques polybromés) sont des molécules très dangereuses qui persistent dans l'environnement et peuvent se retrouver dans les aliments. Ils sont soupçonnés d'être des perturbateurs endocriniens et de générer des effets néfastes sur le système nerveux qui se reflètent dans le comportement. Les retardateurs de flamme bromés ne sont pas trouvés dans les échantillons de miel biologique.

Les six PCB recherchés se retrouvent dans tous les échantillons des trois zones géographiques italiennes, à des concentrations comprises entre 0,27 et 0,92 ng/g. Aucune différence significative dans les concentrations de ces molécules n'a été enregistrée dans les échantillons. Aucune différence significative dans les concentrations de ces molécules n'a été enregistrée dans les échantillons.

- Une recherche menée en Italie, en 2016, a examiné la présence de 250 pesticides dans 80 échantillons de cire provenant de 40 ruchers conventionnels et 40 ruchers biologiques.⁷⁰ Les analyses ont été réalisées par chromatographie en phase gazeuse et par chromatographie en phase liquide avec un spectromètre de masse. Des échantillons composés de 5 g de cire ont été

analysés dans les 48 heures suivant l'échantillonnage. Les résultats montrent qu'aucun des échantillons de cire provenant de l'apiculture conventionnelle n'était exempt de pesticides et que seuls 11 échantillons (27,5%) provenant de l'apiculture biologique étaient exempts de pesticides. Parmi les 250 molécules recherchées, 30 ont été trouvées dans les échantillons issus de l'apiculture traditionnelle et 24 dans les échantillons biologiques. La positivité moyenne était de 5 molécules par échantillon de cire provenant de l'apiculture conventionnelle et de 3 positivités pour les échantillons biologiques. En général, les concentrations dans les échantillons conventionnels sont plus élevées, mais dans les échantillons organiques, des molécules comme les pyréthroides sont trouvées à des concentrations plus élevées. Dans les deux groupes, des résultats positifs ont été trouvés pour certaines molécules qui sont interdites en Europe depuis plusieurs années. Cela ressort dans le groupe d'échantillons de cire conventionnelle pour les molécules acrinathrine (autorisée pour les traitements agricoles en 2011), chlorphenvinphos (retirée du marché en 2004), et dans le cas de la cire biologique pour les molécules roténone (interdite sur le marché européen en 2008) et cyperméthrine (autorisée pour les traitements agricoles en 2009). Bien que la vente illégale de pesticides ne puisse être exclue, les résultats positifs concernant les substances interdites sur le marché italien et européen sont, selon les auteurs, plus probablement liés à la réutilisation de la cire et à la forte persistance qui caractérise ces substances. La réutilisation de la cire pour la production de plaques de cire entraîne la recirculation de produits chimiques dont les concentrations restent constantes pendant de très longues périodes et qui sont ajoutés à d'autres composés chimiques au fil des ans. Un relevé des acaricides largement utilisés en apiculture en Suisse montre que des résidus de bromopropylate, de coumaphos, de fluvalinate, de fluméthrine et de thymol se retrouvent dans la cire traitée à haute température.^{70, 1280}

L'absence de contrôles facilite la circulation de la cire d'abeille provenant de pays non européens, qui sont soumis à des réglementations différentes et à des limites différentes pour les divers ingrédients actifs. Un exemple frappant est la présence de paradichlorodiphényltrichloroéthane (DDT) et de ses métabolites dans plusieurs échantillons. La relation entre la molécule "mère" pp-DDT et ses métabolites suggère l'utilisation récente du paradichlorodiphényltrichloroéthane (DDT), interdit en Europe depuis une quarantaine d'années mais encore utilisé dans de nombreux pays d'Afrique et d'Asie.

Les résultats qualitatifs et quantitatifs des analyses chimiques effectuées sur les échantillons de cire d'abeille "conventionnelle" sont rapportés ci-dessous, indiqués dans l'ordre par : *le nom de la molécule ; le nombre d'échantillons positifs (sur 40 échantillons totaux) ; la concentration maximale (mg/kg) ; la concentration moyenne (mg/kg).*⁷⁰

1. acrinathrine	11 - 0,063 - 0,026
2. amitraz	7 - 0,016 - 0,012
3. bromopropylate	4 - 0,021 - 0,018
4. chlordane	1 - 0,011 - 0,011
5. chlorfenvinphos	28- 0,52 - 0,145
6. chlorobenzilate	1 - 0,02 - 0,02
7. chloropropylat	3 - 0,02 - 0,018
8. coumaphos	31 - 0,76 - 0,160
9. cymiazole	1 - 0,028 - 0,028
10. cyperméthrine	2 - 0,67 - 0,064
11. cyprodinil	1 - 0,012 - 0,012
12. DDD-pp	6 - 0,086 - 0,056
13. DDE-pp	1 - 0,013 - 0,013
14. DDT-pp	5 - 0,131 - 0,089
15. fludioxonil	1 - 0,011 - 0,011
16. fluméthrine	3 - 0,079 - 0,05

17. fluvalinate-tau	19 - 1,1 - 0,351
18. heptachlore	1 - 0,016 - 0,016
19. iprodione	1 - 0,011 - 0,011
20. lindane	1 - 0,01 - 0,01
21. penconazole	1 - 0,056 - 0,056
22. perméthrine	1 - 0,111 - 0,111
23. pyréthrine	1 - 0,65 - 0,65
24. butoxyde de pipéronyle	14 - 2,3 - 0,524
25. pyriméthanil	1 - 0,011 - 0,011
26. roténone	10 - 0,03 - 0,017
27. spiroadiclofen	1 - 0,013 - 0,013
28. spiroxamine	1 - 0,011 - 0,011
29. tébuconazole	1 - 0,01 - 0,01
30. tétraméthrine	2 - 0,37 - 0,192

Les résultats qualitatifs et quantitatifs des analyses chimiques effectuées sur les échantillons de cire d'abeille "biologique" sont rapportés, indiqués dans l'ordre par : le *nom de la molécule* ; le *nombre d'échantillons positifs (sur un total de 40 échantillons)* ; la *concentration maximale (mg/kg)* ; la *concentration moyenne (mg/kg)*.⁷⁰

1. α -HCH	1 - 0,038 - 0,038
2. amitraz	7 - 0,017 - 0,012
3. bromopropylate	2 - 0,018 - 0,014
4. chlordane	1 - 0,013 - 0,013
5. chlorfenvinphos	18 - 0,029 - 0,018
6. chlorpyrifos éthyl	2 - 0,045 - 0,043
7. coumaphos	29 - 0,024 - 0,016
8. cyperméthrine	2 - 0,104 - 0,071
9. DDD-op	2 - 0,044 - 0,028
10. DDD-pp	3 - 0,07 - 0,040
11. DDT-op	1 - 0,017 - 0,017
12. DDT-pp	8 - 0,1 - 0,059
13. diazinon	1 - 0,027 - 0,027
14. fluméthrine	5 - 0,066 - 0,034
15. fluvalinate-tau	26 - 0,082 - 0,042
16. heptachlore	2 - 0,016 - 0,013
17. pendiméthaline	2 - 0,018 - 0,014
18. pyréthrine	3 - 2,076 - 1,051
19. butoxyde de pipéronyle	16 - 0,08 - 0,033
20. roténone	8 - 0,062 - 0,040
21. tébuconazole	1 - 0,011 - 0,011
22. terbuthylazine	1 - 0,011 - 0,011
23. tetrachonazole	3 - 0,016 - 0,012
24. tolfluanide	2 - 0,015 - 0,014

Les producteurs de miel biologique doivent placer leurs ruches à au moins 3 km des sites susceptibles de favoriser la contamination des produits apicoles.⁵⁵ Comme on peut le constater, l'application de cette mesure préventive est presque impossible.

En Italie, les pesticides suivants sont autorisés en apiculture traditionnelle (2019) : l'amitraz, le tau-fluvalinate et la fluméthrine, qui peuvent tous être utilisés sans prescription vétérinaire.²¹⁹ Le tau-fluvalinate (un pyréthroïde dont la concentration maximale tolérée dans le miel est de 10 ppb) ne peut pas être utilisé pendant la production de miel et, s'il l'est, ne doit pas être utilisé

pour la consommation humaine ; en outre, la cire des nids peut être utilisée seulement 180 jours après la date de fin du traitement. ^{219, 220}

En apiculture biologique, les molécules suivantes ne sont pas autorisées contre l'acarien parasite *Varroa destructor* : thymol, acide formique, acide acétique et acide oxalique. L'acide formique et l'acide oxalique peuvent être trouvés dans le miel à des concentrations très faibles. ¹⁰⁷ L'acide formique, lorsqu'il est utilisé à des concentrations élevées, peut réduire la survie des larves, des abeilles ouvrières et de la reine et, en fin de compte, diminuer la taille de la colonie. L'acide oxalique est distribué dans une solution de sucre sous forme de cristaux, qui stimulent le toilettage mutuel sur la cuticule des insectes. Cette technique induit une élimination mutuelle du parasite, l'acarien *Varroa*. L'acide oxalique peut alors être ingéré, générant des effets négatifs tels qu'une activité et une longévité réduites. ¹⁰⁷

Le Tymol, un terpène volatil produit par certaines fleurs et distribué par les apiculteurs dans la ruche par fumigation, peut également être utilisé contre le *Varroa*. Cette molécule peut rester dans le miel et la cire et, à des concentrations élevées, peut causer des dommages à la ruche et modifier l'expression génétique (par exemple, elle réduit l'expression du gène qui produit la protéine vitellogénine ; l'expression de cette protéine dépend de la consommation de pollen). ^{13, 107}

La réglementation (mise à jour 2018) prévoit une concentration maximale admissible de pesticides dans le miel, la propolis et la gelée royale inférieure à 0,01 mg/kg. ⁷⁷ Dans le cas de la cire, une concentration maximale de la somme de 6 ingrédients actifs (coumaphos, fluvalinate, chlorfenvinphos, cymiazole, amitraz, fluméthrine) de 0,3 mg/kg est réglementée, ce qui est beaucoup plus élevé que la limite générique de 0,01 mg/kg.

Dans la cire organique, les concentrations maximales admissibles sont : coumaphos $\leq 0,2$ mg/kg ; fluméthrine $\leq 0,2$ mg/kg ; fluvalinate $\leq 0,1$ mg/kg ; chlorfenvinphos $\leq 0,1$ mg/kg. ⁷⁷ Dans la cire issue de l'apiculture biologique, les concentrations d'acaricides supérieures à la limite de 0,01 mg/kg sont tolérées. La réglementation volontaire sur l'agriculture biologique tolère la contamination de la cire qui peut générer des effets négatifs sur la colonie, elle est donc conçue pour répondre à des critères économiques plutôt que sanitaires et environnementaux.

- Les abeilles domestiques peuvent être contaminées par des polluants persistants tels que les polychlorobiphényles (PCB) et les polybromobiphényles (PBDE), qui sont omniprésents dans l'environnement. En Italie, 95 échantillons de miel biologique du Piémont, de Lombardie et d'Émilie-Romagne achetés sur le marché (18/95 sont des mélanges de miels européens) ont été testés pour la présence de plusieurs polluants persistants. ¹¹⁹⁶ Les PCB sont identifiés dans trois des cinq zones avec une fréquence d'occurrence comprise entre 7 et 33% des échantillons, avec des concentrations allant jusqu'à 234 ng/g. Ces polluants sont omniprésents et, en fait, les molécules de PCB ne sont pas liées à la zone géographique d'origine du miel. Les retardateurs de flamme sont également trouvés avec la même tendance indiquant l'indépendance de la zone géographique d'origine car ce sont des polluants persistants. Des hydrocarbures aromatiques polycycliques et des molécules interdites depuis les années 1970, comme les métabolites de l'insecticide organochloré DDT (pp'DDD jusqu'à 24 ng/g) sont également détectés. Dans un échantillon provenant de Hongrie, le lindane a été trouvé à une concentration de 16,9 ng/g et dans un échantillon provenant d'Ukraine à une concentration de 116 ng/g. Une autre molécule non autorisée (le mevinphos) se trouve également à des concentrations dangereuses dans les miels de quatre des cinq zones examinées. Le miel biologique d'Ukraine et de Hongrie a enregistré une concentration alarmante de 65 ng/g de disulfoton.

En conclusion, ce travail confirme la présence, également dans le miel organique, de contaminants organiques omniprésents : PCB, PBDE, retardateurs de flamme, hydrocarbures aromatiques polycycliques se retrouvent dans des contextes urbains, industriels et agricoles, bien

que le miel des zones industrielles soit plus contaminé. Dans le miel biologique, certains pesticides sont enregistrés à des concentrations dangereuses : les molécules interdites sont retrouvées à des concentrations supérieures aux limites maximales autorisées. Enfin, une bonne nouvelle : on ne trouve ni antibiotiques ni néonicotinoïdes dans cette étude.

- Dans les Pouilles, un contrôle a été effectué en 2019 et 2020 sur 98 échantillons de miel biologique produit dans différentes zones.¹²⁰¹ Différentes catégories de polluants persistants ont été recherchées, comme les PCB (polychlorobiphényles), les PBDE (polybromodiphényles), les HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques) et certains pesticides tels que les organochlorés (alpha-HCH), le bêta-BHC, le lindane ou l'hexachlorobenzène, l'heptachlore, l'époxyde d'heptachlore, l'aldrine, la dieldrine, l'endrine, l'aldéhyde d'endrine, l'endosulfan I, l'endosulfan II, le sulfate d'endosulfan, le transchlordane, le 4,4'-DDE, le 4,4'-DDT, le 2,4'-DDT, le 4,4'-DDD et méthoxychlore), les organo-phosphorés (anziphos méthyl, boscalid, bupiramate, captan, chlorantraniliprol, chlorpyrifos, coumaphos, diazinon, disulphoton, ethoprophos, fenchlorphos, fenthion, fluazinam, iprodion, méthyl parathion, mevinphos, penconazol, phorate, prothiophos, pyraclostrobine, sulprophos, quinoxyfen, spiroadiclofen, tetrachlorpyrophos, tribuphos, trifloxystrobine, florisil et 4-nonylphenol) et d'autres molécules (glyphosate, glufosinate et AMPA). Les résultats de l'analyse de 98 échantillons de miel biologique des Pouilles ont montré que :¹²⁰¹

- Tous les échantillons présentent des traces d'hydrocarbures aromatiques polycycliques (benzofluoroanthène). Certaines molécules ne sont présentes que dans quelques échantillons (chrysène).
- Des traces de six PCB testés sont trouvées dans tous les échantillons. La présence de PCB n'est pas corrélée aux zones géographiques, ce qui indique qu'ils sont omniprésents.
- Des traces de PBDE sont détectées dans tous les échantillons. Cela confirme également qu'il s'agit de polluants persistants et omniprésents.
- Des traces de pesticides organochlorés sont trouvées dans tous les échantillons, y compris le DDT et ses dérivés. Il s'agit de molécules très persistantes, comme le DDT et ses métabolites, dont la demi-vie dans le sol est de 25 ans. La molécule la plus fréquemment retrouvée était l'hexachlorobenzène (ou lindane). Ces molécules sont interdites depuis des années.
- Les pesticides organophosphorés sont détectés à de faibles concentrations dans toutes les zones géographiques examinées. Dans deux échantillons provenant de vergers, l'azinphos méthyle a été trouvé à des concentrations élevées (0,33 et 1,32 ng/g). L'acaricide coumaphos a été trouvé à une concentration maximale de 2,13 ng/g, bien que son utilisation soit interdite (miel biologique).
- Le glyphosate, le glufosinate et l'AMPA n'ont pas été détectés.

Le miel certifié biologique contient plusieurs polluants persistants, tous d'origine anthropique, et l'utilisation illégale de certaines molécules (par exemple, des acaricides par les apiculteurs) ne peut être exclue. La contamination de l'environnement est si répandue que l'on trouve partout des molécules très dangereuses (persistantes, bioaccumulables et toxiques), tant dans les zones agricoles que dans les zones urbaines et industrielles. Les effets synergiques entre ces différentes catégories de polluants sont en grande partie inconnus mais prévisibles et très nocifs.

CONTAMINATION DES ABEILLES PENDANT LE SEMIS

L'utilisation de semences traitées avec des pesticides systémiques tels que les insecticides néonicotinoïdes expose les abeilles à des concentrations toxiques. Les insectes entrent en contact avec ces pesticides s'ils volent dans la zone de semis ou indirectement par dérive : les fleurs à proximité des champs de semis contiennent des concentrations dangereuses. Il s'agit d'une contamination non désirée mais inévitable.

- En Italie (en 2009 et 2010), le risque de contamination des abeilles (*Apis mellifera*) par des particules et des insecticides lors des semis de maïs a été évalué.⁷³ Quatre ingrédients actifs utilisés dans le maïs pour le traitement des semences ont été examinés : l'imidaclopride, la clothianidine, le thiaméthoxam et le fipronil. Les trois premiers sont des néonicotinoïdes et ont une toxicité de contact (DL₅₀ dose létale par contact capable de tuer 50% des insectes exposés en quelques heures) de 18 ng/abeille, 22 ng/abeille et 30 ng/abeille respectivement ; le fipronil a une DL₅₀ par contact de 4 ng/g. Pendant le semis du maïs, la concentration de ces 4 molécules dans la poussière et l'air est mesurée. La contamination peut se produire lors des vols à proximité des semis et lorsque les abeilles se nourrissent des gouttelettes de guttation des feuilles de maïs (*Zea mays*).^{359, 400} La guttation consiste en l'élimination de l'eau liquide des feuilles et se produit lorsque, en raison d'une humidité atmosphérique excessive, la transpiration ne peut avoir lieu régulièrement ou lorsque la quantité d'eau absorbée par les racines est supérieure à celle transpirée par les feuilles (ce phénomène peut se produire à travers les stomates, les ouvertures des feuilles).²³⁴

Les molécules recherchées se trouvent à des concentrations supérieures à celles qui génèrent des effets sublétaux très dangereux, notamment :⁷³

- De très faibles doses de fipronil (0,5 ng/abeille) appliquées par contact endommagent la capacité olfactive. Les effets sublétaux du fipronil ont été mesurés à des doses de 1/80 et 1/40 de la DL₅₀.
- De très faibles doses de clothianidine (néonicotinoïde) appliquées une fois (0,7 ng/abeille) altèrent la capacité des abeilles à retourner à la ruche. Des doses encore plus faibles (0,47 ng/abeille) permettent aux abeilles de revenir, bien qu'elles ne soient pas en mesure de reprendre leur activité de butinage avant plusieurs heures.

Les semences de maïs de cette étude contenaient 1 mg/semence d'imidaclopride, 1,25 mg/semence de clothianidine, 0,6 mg/semence de thiaméthoxam et 0,5 mg/semence de fipronil. Les semences ont été vendues en sacs de 25.000 graines qui contiennent donc 71 g de néonicotinoïdes et 12,5 g de fipronil. Les semences sont plantées à une densité de 75.000 graines par hectare, ce qui correspond à la distribution d'environ 214 g de néonicotinoïdes par hectare et 38 g de fipronil par hectare. La poussière produite lors du semis a été estimée à environ 3 g pour 100 kg de graines. Les concentrations suivantes de matières actives ont été trouvées dans la poussière produite lors du semis (à une distance comprise entre 5 et 20 m du semoir et en µg/m³) :

- clothianidine 0,1-0,5 ;
- fipronil 0,01-0,04 ;
- imidaclopride 0,01-0,06 ;
- thiaméthoxame 0,02-0,03.

Ces concentrations représentent l'exposition que les abeilles subissent théoriquement en volant à proximité du semoir. Dans ce travail, l'exposition est estimée en considérant que le semis dure 80 minutes par hectare et que les abeilles volent 10 fois sur 50 m autour de la zone de semis. Selon les auteurs, en appliquant le meilleur système de semis possible, les abeilles sont exposées par contact à des concentrations de ces 4 molécules, pendant le vol, entre 0,3% et 0,5% de la

DL₅₀ (les méthodes de semis les plus courantes pourraient générer une exposition plus élevée). Ces doses pourraient être suffisantes pour générer des effets sublétaux. Des recherches antérieures (2001) avaient également détecté cette voie de contamination possible.⁷³

- La poussière produite lors du semis de maïs traité à l'imidaclopride contamine l'herbe et les fleurs des champs voisins. Sur des fleurs situées à proximité de champs de maïs, l'imidaclopride a été trouvé à des concentrations comprises entre 22 et 54 µg/kg.³⁷⁶ Sachant que la dose capable de tuer les abeilles en 48 heures a été estimée entre 5 et 500 milliardièmes de gramme par abeille (ng/abeille), cela signifie que les concentrations trouvées dans les fleurs peuvent être 1.000 fois plus élevées. Ainsi, les abeilles peuvent être gravement blessées par les fleurs situées à proximité des cultures. Les auteurs dans leurs conclusions suggèrent comme solution d'ajouter un système de collage du pesticide sur la graine : il serait plus clairvoyant de suggérer de ne pas utiliser ces molécules.³⁷⁶

- Dans des travaux ultérieurs, on a découvert que lorsque les abeilles volent pendant le semis de graines enrobées de néonicotinoïdes, elles recueillent sur leur corps environ 100 milliardièmes de gramme par abeille (ng/abeille) d'insecticide.³⁹⁹ Dans ce cas, des insecticides néonicotinoïdes tels que la clothianidine à une concentration de 1,25 mg par graine de maïs et l'imidaclopride à une concentration de 0,5 mg par graine de maïs ont été utilisés ; le semis a eu lieu à une densité de 73.000 à 74.000 graines par hectare (cette quantité correspond à environ 90 g de clothianidine par hectare). Pendant leur vol à proximité de la zone de semis, les abeilles recueillent des doses d'insecticides qui peuvent les tuer. Des quantités élevées ont été enregistrées : jusqu'à 674 ng de clothianidine par abeille ou jusqu'à 3.661 ng par abeille d'imidaclopride (chez des insectes trouvés morts ou mourants quelques heures après le semis).³⁹⁹ La dose qui tue 50% des insectes exposés par contact (DL₅₀) est de 21,8 ng par abeille pour la clothianidine et de 17,9 ng par abeille pour l'imidaclopride. En examinant les concentrations, il s'ensuit que les insectes qui volent pendant la plantation sont exposés à des doses de néonicotinoïdes bien supérieures à celles considérées comme toxiques et mortelles en quelques heures. Cette étude montre que l'augmentation de l'humidité de l'air renforce les effets toxiques des néonicotinoïdes distribués pendant le semis. Il est surprenant que les auteurs, à la fin de l'article, proposent comme solution possible l'utilisation, dans le futur, de machines à semer qui pourraient réduire la dispersion des insecticides dans l'air. Cette proposition n'évitera pas la dispersion de molécules très toxiques et persistantes dans l'environnement, elle n'est donc pas une solution. D'autre part, les fabricants de néonicotinoïdes tels que l'imidaclopride affirment qu'il n'y a aucun risque de contamination des abeilles lors des semis.⁷⁰⁰ Cependant, plusieurs rapports, tant dans la littérature scientifique que dans la presse, font état d'une augmentation de la mortalité des abeilles lors du semis de graines enrobées de néonicotinoïdes, comme celles du maïs et du tournesol (par exemple en France et au Canada).^{701, 702} Les abeilles sauvages sont également affectées par l'utilisation de néonicotinoïdes dans les semences.⁴¹¹

CONCLUSIONS

En conclusion, les nombreux résultats résumés ci-dessus montrent que la contamination chimique délibérée des ruchers est, à elle seule, suffisante pour expliquer la mortalité accrue des abeilles, des pollinisateurs et autres. Si un groupe de chercheurs non informés de la situation réelle essayait d'estimer les niveaux de mortalité attendus à partir des concentrations enregistrées, ils seraient probablement surpris de trouver des niveaux de mortalité aussi faibles chez les abeilles domestiques.

Un autre aspect négatif à souligner est l'utilisation de ressources économiques publiques pour obtenir des informations sur le niveau de contamination des colonies d'abeilles sans avoir pratiquement aucune information sur les molécules utilisées sur le terrain, les doses, les méthodes de distribution, etc. Les secteurs de l'agriculture et de l'apiculture semblent être absents de ces projets de surveillance. Dans les pays industrialisés comme l'Italie, en théorie, tous les traitements effectués, tant en agriculture qu'en apiculture, doivent être enregistrés. Il est vraiment désarmant et décourageant de mesurer dans ces publications l'absence totale de coopération entre ceux qui profitent de l'empoisonnement de la planète et ceux qui tentent d'en apporter une confirmation indiscutable et utile. Pourtant, le secteur agricole, du moins en Europe ainsi qu'en Amérique du Nord, survit grâce à des fonds publics très généreux. Il est probablement venu le moment d'exiger un autre type de coopération en échange des énormes ressources économiques publiques. Des ressources précieuses sont gaspillées à la recherche de molécules qui ne sont pas utilisées et il n'y a probablement pas assez d'informations sur d'autres molécules qui sont largement utilisées. En outre, aucun système de garantie ne peut résister s'il repose principalement sur un contrôle analytique final ou sur la capacité éventuelle de la recherche publique, a posteriori, à confirmer la dangerosité de choix faits presque exclusivement au profit des entrepreneurs (sur la base de règles égoïstes et non durables).

CONTAMINATION PAR LE MÉTAL

LA POLLUTION DES MÉTAUX DANS LE SOL

Les métaux sont un contaminant environnemental émis en permanence par une multitude de sources et ils se caractérisent par leur non-dégradation. Ils peuvent entrer dans des cycles biochimiques et physiques, et sont capables de circuler dans la chaîne alimentaire pendant de longues périodes. Les sources anthropiques de métaux sont nombreuses : exploitation minière, gestion des déchets industriels, rejets d'eaux usées, émissions des véhicules et des incinérateurs, combustion du charbon, activités agricoles telles que la fertilisation, utilisation de fongicides (à base de cuivre, par exemple), etc.^{71, 176}

Certains métaux présents dans l'atmosphère, comme le cadmium, le mercure, le nickel et le plomb, sont des indicateurs d'activités anthropiques et peuvent être très dangereux pour la santé.

³⁸ Par exemple, le cadmium (Cd), qui est utilisé pour produire des engrais chimiques, et le chlorure de polyvinyle (PVC) sont classés comme cancérigènes pour l'homme (groupe 1 de la classification établie par le CIRC ou Centre international de recherche sur le cancer).

Le cadmium et le mercure (Hg) peuvent être utilisés comme indicateurs environnementaux des émissions des usines d'incinération, tandis que les autres métaux peuvent provenir de sources plus diffuses telles que le trafic automobile. Le chrome (Cr) et le cuivre (Cu) sont associés au trafic urbain et le cadmium (Cd) aux émissions industrielles.⁶⁴

Les métaux émis dans l'atmosphère se déposent dans les sols, qui peuvent également être contaminés par l'utilisation d'engrais (par exemple, boues d'épuration, compost), de pesticides ou d'eau polluée.

Les concentrations minimales et maximales suivantes de certains métaux peuvent être trouvées dans les sols :⁷⁶⁸

- Cadmium entre 0,005 mg/kg et 750 mg/kg (sols contaminés par des fonderies de plomb et de zinc).
- Cuivre entre 0,3 et 3.215 mg/kg (parmi les sols contenant les quantités les plus élevées figurent ceux des vignobles, où sont utilisés des fongicides à base de cuivre).
- Plomb entre 0,015 mg/kg et 400 mg/kg dans les sols proches de routes fréquentées.

Les métaux présents dans le sol peuvent être absorbés par les plantes, qui peuvent également les absorber dans l'atmosphère et dans l'eau contaminée. Par conséquent, les métaux, une fois libérés dans l'atmosphère ou dans l'eau, peuvent facilement entrer dans la chaîne alimentaire.

Le tableau suivant montre les valeurs de dépôt de métaux sur le sol mesurées dans différents types de zones européennes (des compteurs¹ de dépôt spéciaux en forme de bouteille avec un entonnoir cylindrique ont été utilisés).^{38, 48, 50}

	Zones rurales	Zones urbaines	Zones industrielles
Arsenic ($\mu\text{g}/\text{m}^2$ par jour)	0,082-0,43	0,22-3,4	2-4,3
Cadmium ($\mu\text{g}/\text{m}^2$ par jour)	0,011-0,14	0,16-0,9	0,12-4,6
Nickel ($\mu\text{g}/\text{m}^2$ par jour)	0,03-4,3	5-11	2,3-22

¹ Le déposimètre peut être constitué d'un entonnoir et d'un conteneur, d'une capacité de 10 litres, reliés ensemble; les deux sont généralement fabriqués en polyéthylène haute densité (PEHD). Le déposimètre est installé sur un trépied métallique équipé d'une enveloppe cylindrique noire pour protéger l'échantillon du rayonnement solaire. La hauteur de la partie supérieure de l'entonnoir du déposimètre par rapport au niveau du sol est généralement comprise entre 1,5 et 2 mètres.

Sur différents sites, les impacts anthropiques peuvent varier considérablement : dans les zones industrielles où, par exemple, les métaux sont traités, des valeurs de dépôt comprises entre 126 et 243 $\mu\text{g}/\text{m}^2$ par jour peuvent être atteintes pour l'arsenic, entre 11,3 et 40,7 $\mu\text{g}/\text{m}^2$ par jour pour le cadmium, et entre 53 et 76 $\mu\text{g}/\text{m}^2$ par jour pour le nickel. Il s'ensuit que la caractérisation du site est une étape préliminaire importante pour finaliser le type de recherche à effectuer.

Dans certains pays européens, comme l'Allemagne, la Suisse, la Belgique et la Croatie, des valeurs limites nationales sont fixées pour l'évaluation des niveaux de métaux pouvant être déposés dans le sol à partir de l'atmosphère (en $\mu\text{g}/\text{m}^2$ par jour).^{38, 48, 50}

Valeur du dépôt atmosphérique au sol en $\mu\text{g}/\text{m}^2$ par jour	Arsenic	Cadmium	Mercure	Nickel	Plomb	Titane	Zinc
Belgique	-	20	-	-	250	10	-
Croatie	4	2	1	15	100	2	-
Allemagne	4	2	1	15	100	2	-
Suisse	-	2	-	-	100	2	400

Le sol est donc un bon indicateur de la pollution par les métaux, tout comme les plantes, qui accumulent les métaux du sol, de l'air et de l'eau. Les métaux peuvent se bio-concentrer dans les tissus végétaux. Le cuivre, par exemple, peut s'accumuler dans les fleurs et les feuilles du radis commun (*Raphanus sativus*), qui est une plante comestible appartenant à la famille des Brassicaceae (cette famille, avec les Asteraceae, est l'une des plus nombreuses des Angiospermes avec environ 350 genres et 3.000 espèces).^{768, 769} Les plantes de la famille des Brassicaceae peuvent également accumuler du sélénium, dans le pollen et le nectar. Par conséquent, les insectes herbivores et les pollinisateurs peuvent être exposés à ces métaux.

Le cuivre est un micronutriment essentiel car il est important pour le fonctionnement d'enzymes telles que celles de la détoxification. Il peut être bioaccumulé dans les feuilles à des concentrations allant jusqu'à 25 mg/kg et peut générer des effets toxiques, tels que l'inhibition de la photosynthèse, des dommages au métabolisme (par exemple des hydrates de carbone) et peut provoquer une réduction du système racinaire. L'une des principales sources de cuivre sont les fongicides, qui sont utilisés en grande quantité dans des cultures telles que les vignobles. L'application constante et répétée de fongicides à base de cuivre entraîne une augmentation dangereuse de la concentration dans le sol (une concentration de 3.216 mg/kg de cuivre a été enregistrée dans les sols de vignobles au Brésil).⁷⁶⁸

Le cadmium et le plomb ne sont pas utiles aux plantes, mais le cadmium s'accumule facilement car il est confondu avec le zinc, qui est un micronutriment. À cause de cette erreur, le cadmium peut facilement se bioaccumuler dans les plantes et générer divers effets négatifs, comme une réduction de la photosynthèse et de la transpiration.

Le plomb atteint le sol principalement à cause de la pollution atmosphérique (par exemple, le transport routier) et peut se bioaccumuler dans les plantes. On peut également trouver du plomb dans le corps des abeilles, le pollen, le miel et la cire.

Les plantes sont capables de bioconcentrer des métaux tels que le cadmium (Cd), le chrome (Cr), le cuivre (Cu), le manganèse (Mn), le plomb (Pb) et le zinc (Zn). La capacité de bioaccumulation (FBC ou facteur de bioconcentration) diminue généralement lorsque la concentration de métaux dans le sol augmente, sauf dans certains cas comme celui du cadmium dans le blé ; toutefois, les quantités absolues de métal accumulé augmentent avec la concentration dans le sol. Le cadmium et le cuivre peuvent s'accumuler dans les graines de blé et de maïs.⁹³³ La capacité de bioaccumulation des métaux est si prononcée que certains chercheurs suggèrent que la culture du maïs peut être utilisée pour réduire la concentration de certains métaux dans le sol (remédiation). Certaines concentrations sont signalées :⁹³³

- Le maïs bioaccumule le manganèse jusqu'à 332 mg/kg, tandis que le colza et le blé jusqu'à 180 mg/kg.
- Le maïs accumule du cadmium jusqu'à 65 mg/kg et le blé encore plus, surtout dans les graines.
- Le blé accumule du plomb jusqu'à 380 mg/kg, le pois fourrager jusqu'à 260 mg/kg.
- Le blé et la vesce fourragère accumulent du chrome jusqu'à 4.500 mg/kg, le colza jusqu'à 7.046 mg/kg.
- La vesce fourragère accumule du zinc jusqu'à 1.200 mg/kg, le maïs et le blé plus de 1.000 mg/kg.

Il ressort de cette enquête que le blé accumule de grandes quantités de cadmium et de cuivre, principalement dans la partie comestible, tandis que le maïs s'accumule dans la partie non comestible pour l'homme. Certains métaux sont plus concentrés dans la paille (par exemple, le cadmium et le cuivre dans les tiges, les feuilles et les racines du maïs), tandis que d'autres se trouvent dans les graines (par exemple, le cadmium et le cuivre dans les graines de blé). En général, le blé, le pois fourrager et la vesce étaient moins résistants aux concentrations élevées de métaux que le maïs et le colza. Malheureusement, le contrôle des substances dangereuses dans les plantes utilisées comme aliments pour animaux ne reçoit pas la même attention que pour les plantes destinées à la consommation humaine directe (par exemple, les pesticides et les métaux), en partie parce qu'il est considéré à tort et superficiellement comme inévitable.

Certaines plantes ont une grande capacité de bioconcentration des métaux, à tel point qu'elles peuvent potentiellement être utilisées pour réduire la contamination des sols. Cette pratique est parfois appelée "assainissement". Par exemple, le radis commun (*Raphanus sativus*) est capable d'accumuler du plomb, du cadmium et du cuivre dans ses racines et ses fleurs. Il s'agit d'une plante annuelle qui nécessite une pollinisation entomophile. Elle constitue donc un indicateur utile de la pollution des sols et des risques pour les insectes phytophages et pollinisateurs. Il a été démontré que la présence des pucerons, qui sont phytophages, est réduite lorsque la concentration de cadmium dans les plantes augmente (200 mg/kg).⁷⁶⁸ Les plantes peuvent concentrer les métaux au point qu'ils deviennent moins attractifs pour les insectes phytophages : ils deviennent toxiques. Cet effet insecticide est également détecté dans le pollen et le nectar (par exemple, 13 mg/kg de cadmium dans les fleurs).⁷⁶⁸ Un aspect intéressant est que la bioconcentration diminue lorsque la concentration de ces métaux dans le sol augmente, ce qui indique que les effets phytotoxiques, au-delà de certaines valeurs, deviennent prédominants. Ainsi, les dommages causés aux insectes seront plus importants lorsque les concentrations dans le sol sont plus faibles, car ils seront exposés à des doses plus élevées dans les tissus végétaux. À l'inverse, lorsque les concentrations dans le sol augmentent, les effets négatifs sur la croissance des plantes et les effets toxiques deviennent prédominants. Les effets indésirables de la contamination des sols par les métaux comprennent une réduction de la biodiversité et de l'abondance des insectes pollinisateurs sauvages. La présence d'abeilles solitaires, qui ont généralement un rayon d'action de quelques centaines de mètres et nichent dans le sol, est réduite à proximité de sols contaminés par des métaux (provenant par exemple d'industries telles que les fonderies).⁷⁷⁰ Une voie d'exposition importante pour ce type d'insecte est le pollen, qui accumule des métaux tels que le cadmium et le plomb.

MÉTAUX DANS LES PRODUITS APICOLES

Les métaux présents dans l'atmosphère peuvent se déposer sur le corps des abeilles ou être absorbés par le pollen, le nectar, le miellat et l'eau (mais aussi par les fumées utilisées par les apiculteurs). Les abeilles butineuses, qui effectuent 12 à 15 vols par jour lorsque les températures sont comprises entre 20 et 25°C, sont des échantillonneurs biologiques potentiels de métaux.

Dans les abeilles vivantes, provenant de colonies situées dans la zone urbaine, les plus fortes concentrations de zinc, de cuivre, de strontium, de nickel et de chrome (Zn, Cu, Sr, Ni et Cr) peuvent être enregistrées. Les zones les plus polluées par le plomb, telles que les zones industrielles et urbaines, génèrent une exposition plus élevée (par ingestion et inhalation), de sorte que de fortes concentrations de métaux sont plus susceptibles d'être trouvées à l'intérieur du corps et à la surface. Le nickel et le chrome se retrouvent également à l'intérieur du corps et à la surface des abeilles.¹⁷

Le miel peut être utilisé pour obtenir des informations sur la présence de ces polluants, car il n'est rien d'autre qu'un nectar concentré : il reflète la pollution présente dans les plantes sur lesquelles il a été récolté. Des métaux tels que le plomb peuvent être trouvés dans le miel produit par des ruches situées dans des zones contaminées, telles que des zones industrielles et urbaines, à des concentrations 2,7 fois plus élevées que dans les ruches situées dans des stations témoins (parcs naturels). Dans les zones urbaines et industrielles, le nickel peut également être enregistré à des concentrations jusqu'à 3,6 fois supérieures, et le chrome jusqu'à 4 fois supérieures. Cela confirme la possibilité d'utiliser le miel comme indicateur de la contamination de l'atmosphère par les métaux. Pour donner un autre exemple, la surveillance du fluor peut être effectuée à travers le miel et la propolis.

Le pollen et, ensuite, la cire sont considérés comme des matrices plus appropriées que le miel pour la détection de polluants environnementaux tels que les métaux.¹⁷ Les abeilles enregistrent également plus de métaux que le miel (représentant la pollution accumulée sur quelques jours).

La biosurveillance des métaux avec les abeilles doit être réalisée dans des colonies qui n'ont pas été exposées à des systèmes d'enfumage pour inspecter la ruche, car ceux-ci peuvent libérer des métaux qui altèrent les résultats. Il faut également interdire aux opérateurs de fumer pendant l'inspection des ruches, car fumer est une autre source de métaux. Le récipient de l'échantillon ne doit pas non plus libérer de métaux.

La détermination de la concentration de métaux dans le miel et les fleurs peut fournir des informations sur la contamination du sol. Le miel de nectar a une très faible teneur en minéraux, entre 0,1 et 0,2%, et sa composition dépend également des plantes et du sol. La composition minérale du miel peut être utilisée pour déterminer son origine botanique et géographique.⁴⁴ La composition minérale du miel peut également être utilisée pour obtenir des informations sur les activités anthropiques dans la région, telles que la fonte, l'exploitation minière, la combustion de combustibles fossiles et l'utilisation d'engrais. À proximité des fonderies, de fortes concentrations de cadmium, de plomb et de zinc ont été associées à une réduction de la diversité et de l'abondance des abeilles sauvages solitaires.^{768, 770}

Certains métaux tels que l'arsenic (As) sont un polluant industriel et ont été utilisés comme insecticide.¹⁰⁷ L'arsenic est capable de générer des effets toxiques aigus (mortalité) à des doses de 400-500 µg/abeille et peut générer un stress oxydatif.

Les métaux, à différents stades de la colonie, peuvent avoir des effets négatifs très différents. Le sélénium est un polluant industriel et agricole, et peut s'accumuler dans certaines plantes. Le sélénium a été trouvé dans le pollen collecté par les abeilles à des concentrations supérieures à 2.830 mg/kg.¹⁰⁷ Le sélénium est toxique car il remplace le soufre dans les acides aminés et modifie la conformation de la structure des protéines, altérant ainsi leurs fonctions.

Les larves d'abeilles, comparées aux insectes adultes, sont 30 fois plus sensibles à l'exposition par ingestion de sélénium lié à des acides aminés et 50 fois plus sensibles au sélénium inorganique. En laboratoire, le sélénium à des concentrations inférieures à 0,72 mg/kg a entraîné une augmentation de la mortalité et des problèmes de développement chez les larves (effets sublétaux).⁷⁶⁸ Le sélénium peut être bioaccumulé dans le nectar et le pollen des plantes Brassicaceae.

Les effets négatifs des métaux sur les colonies d'abeilles sont démontrés par plusieurs études. L'ajout artificiel de métaux tels que le cadmium (Cd), le cuivre (Cu), le plomb (Pb) et le sélénium (Se) au régime alimentaire des abeilles, à des concentrations que l'on peut facilement trouver dans le miel et le pollen, a montré des effets négatifs sur la colonie (dans ce cas, les insectes ont été nourris avec du sirop de sucre additionné de métaux et un aliment de remplacement du pollen qui est généralement basé sur des acides aminés et des vitamines, et qui contient également des graisses).¹⁷⁷ Les résultats rapportés dans cette étude montrent que les concentrations de métaux dans les fleurs sont plus élevées que dans les abeilles adultes, et ces dernières ont des concentrations plus élevées que dans le miel.¹⁷⁶ Le cadmium, le cuivre et le sélénium entraînent une mortalité plus élevée chez les abeilles juvéniles et le sélénium diminue le poids total des abeilles ouvrières de la colonie. Les concentrations des quatre métaux chez les abeilles adultes étaient toujours plus élevées que chez les larves, ce qui montre qu'une certaine forme de bioaccumulation existe au cours de la courte vie de ces insectes. Il existe également des preuves des effets négatifs de l'exposition aux métaux (par exemple, *Osmia rufa*) pour d'autres insectes pollinisateurs.¹⁷⁶

Le tableau suivant indique les concentrations de cadmium, de cuivre, de plomb et de sélénium relevées dans certaines plantes, le miel et les abeilles.¹⁷⁶

Métaux	Matrices (<i>Apis mellifera</i> ou plantes)	Domaines	Concentrations (mg/kg)	
Cadmium	Abeilles ouvrières	Zone urbaine et industrielle en Belgique	0,06-0,1	
	Les abeilles butineuses	Centre urbain proche de l'autoroute en Italie	2,87 - 4,23	
	Les abeilles butineuses	Site industriel en Finlande	0,05 - 1,2	
	Les abeilles butineuses	Site industriel en République tchèque	0,74 - 1,75	
	Les abeilles butineuses	Site pollué en Italie	0,05 - 0,06	
	Les abeilles butineuses	Site industriel en Pologne	0,39 - 0,81	
	Miel	Zone urbaine en Turquie	0,32	
	Miel	Zone industrielle en Roumanie	0,017	
	Miel	Zone agricole et industrielle en Égypte	0,1 - 0,41	
	Fleurs de trèfle	Zone agricole et industrielle en Égypte	0,41	
	Fleurs de <i>Raphanus sativus</i>	Serre	13	
	Cuivre	Les abeilles butineuses	Site industriel en Finlande	14 - 27
		Les abeilles butineuses	Site industriel en République tchèque	31,9 - 37,7
Les abeilles butineuses		Site industriel en Pologne	20,2 - 25,5	
Miel		Turquie	0,2	
Miel		Zone agricole et industrielle en Égypte	2,3 - 11	
Miel		Site industriel en Pologne	0,01 - 23,5	
Fleurs de trèfle		Zone agricole et industrielle en Égypte	51	
Fleurs de <i>Raphanus sativus</i>		Serres	32	
Plomb		Abeilles ouvrières	Zone urbaine et industrielle en Belgique	0,33 - 0,41
	Les abeilles butineuses	Site industriel en Pologne	1,46 - 2,32	
	Miel	Zone industrielle en Roumanie	0,19 - 0,2	
	Miel	Zone agricole et industrielle en Égypte	1	
	Fleurs de trèfle	Zone agricole et industrielle en Égypte	2,9	
	Fleurs de <i>Raphanus sativus</i>	Serres	1,16	
	Pollen	Zone urbaine en Italie	0,27	

Sélénium	Les abeilles butineuses	Site industriel en Pologne	1,7-11
	Miel	Site industriel en Pologne	0,11 - 0,83
	Fleurs de <i>Raphanus sativus</i>	Champs	25
	Pollen de <i>Raphanus sativus</i>	Champs	5,6 - 2.830
	Nectar de <i>Brassica juncea</i>	Serre	110
	Nectar de <i>Stanleya pinnata</i>	Serre	150

ENQUÊTES INTERNATIONALES SUR LES MÉTAUX DANS LES PRODUITS APICOLES

Les résultats de certains contrôles des métaux dans les produits apicoles effectués à l'étranger sont rapportés.

- Aux États-Unis, des chercheurs ont pu cartographier la répartition territoriale de métaux dangereux tels que le cadmium, le fluor et l'arsenic en examinant les concentrations dans le pollen et les abeilles.³¹ Les recherches ont été effectuées entre 1982 et 1983 dans la région de Washington pendant les mois de juillet à septembre. 64 apiculteurs ont collecté des échantillons sur 72 sites couvrant une superficie d'environ 7.500 kilomètres carrés. En mesurant l'évolution de la concentration de ces éléments dans les abeilles, il a été possible de construire une carte des courbes de concentration constante et d'identifier les zones les plus contaminées. En fait, il a été possible d'isoler les zones où les substances ont été libérées.

- En France (mai-juin 1999), une étude a examiné les concentrations de différents métaux dans 150 échantillons de miel d'acacia (*Robinia pseudoacacia*) prélevés dans des zones contaminées et non contaminées. Plusieurs éléments ont été recherchés : Ag, Ca, Cr, Co, Cu, Fe, Li, Mg, Mn, Mo, P, S, Zn, Al, Cd, Hg, Ni et Pb.^{17, 33} L'argent (Ag), le cuivre (Cu), l'aluminium (Al), le zinc (Zn) et le soufre (S) ont été trouvés dans des échantillons de miel provenant de ruches situées près de zones industrielles. Le calcium (Ca), le magnésium (Mg) et le phosphore (P) ont été détectés dans tous les échantillons analysés. L'aluminium (Al), le molybdène (Mo) et le soufre (S) ont été trouvés dans plus de 50% des échantillons, le cobalt (Co) dans 30% et le chrome (Cr) dans 20%. Les concentrations minimales et maximales mesurées pour certains métaux étaient les suivantes :

Métaux dans les échantillons de miel d'acacia (<i>Robinia pseudoacacia</i>)	Échantillons positifs sur 150	Pourcentage d'échantillons positifs	Concentration minimale et maximale, en ppm
Aluminium	99	66	0,05-1,4
Argent	10	6,7	0,08-0,16
Football	150	100	2,9-108,5
Chrome	33	22	0,05-0,52
Cobalt	46	30,7	0,03-0,25
Cuivre	72	48	0,03-2,3
Fer	107	71,3	1,4-109,5
Lithium	5	3,3	0,02-0,2
Magnésium	150	100	1,4-109,5
Manganèse	141	94	0,06-10,3
Molybdène	86	57,3	0,07-0,81
Phosphore	150	66	32,1-397,5
Soufre	84	6,7	1,6-67,7
Zinc	67	100	0,04-5,9

Il est important de remarquer que lors de cette surveillance, le nickel, le mercure, le cadmium et le plomb n'ont été trouvés dans aucun des 150 échantillons de miel d'acacia. L'argent et le chrome indiquent la présence d'une zone industrielle contaminée. Le soufre est un contaminant qui peut indiquer la présence de routes très fréquentées (par exemple, des autoroutes) ou d'industries particulières (par exemple, des textiles). Les métaux mis en évidence en gras, comme l'argent, le chrome et le cobalt, indiquent une pollution due aux activités humaines.

D'autres résultats sont rapportés dans la même publication : ¹⁷

- Un autre contrôle effectué en France entre 1986 et 1996 a révélé que 10% des 97 échantillons de miel contenaient du plomb,
- En 1994, 3% de 122 échantillons de miel français contenaient du cadmium.

- Une surveillance menée en Pologne (2009) a examiné les concentrations de métaux tels que le cadmium dans une zone industrielle et une zone agricole. ⁴⁰ Le nickel, le plomb, le fer, le zinc et le magnésium ont été recherchés dans des échantillons de miel (multifloral), de propolis, de cire (de l'année) et de pollen (prélevé par les abeilles avec un système mécanique spécial). Les échantillons ont été choisis au hasard parmi les 10 ruches de chacun des 8 ruchers utilisés. En 2009, 80 échantillons ont été prélevés pour chaque type de matrice (soit un total de 320 échantillons de 2 g chacun). La plus faible concentration des métaux recherchés a été enregistrée dans le miel, tandis que la cire a enregistré la plus forte.

Le miel contenait les plus faibles concentrations de cadmium, nickel, plomb, zinc et fer, tandis que la cire contenait les plus fortes concentrations de cadmium (0,099 µg/g), fer (334 µg/g) et plomb (3,13 µg/g), et la propolis contenait du nickel (9,81 µg/g). Le plomb a également été trouvé à des concentrations élevées dans le pollen et la propolis. Le pollen contenait les plus fortes concentrations de magnésium (2.580 µg/g) et de zinc (159 µg/g) ; ces métaux étaient également présents en fortes concentrations dans la cire et la propolis. Le fer, le zinc et le magnésium sont des métaux essentiels et se trouvent donc en forte concentration dans le pollen. Dans cette étude, on a constaté que la cire était contaminée par du plomb et du cadmium. Il faut garder à l'esprit que la cire est sécrétée par des glandes situées sur l'abdomen des abeilles et peut être recyclée par les apiculteurs (dans cette étude, la cire de l'année a été utilisée, c'est-à-dire qu'elle n'a pas été recyclée), tandis que le miel est dérivé du nectar des fleurs et de la nourriture qui peut être fournie par les apiculteurs.

- Une étude menée sur plusieurs sites en Finlande (urbains, industriels et de contrôle ; travaux publiés en 2000) a montré que le pollen et le miel ne sont pas de bons bio-indicateurs de la présence de métaux tels que le cadmium, le plomb, le cuivre, le fer, le manganèse et le zinc dans l'environnement. ⁷⁰⁸ D'autre part, les abeilles peuvent être utilisées pour surveiller certains métaux, puisque les concentrations moyennes suivantes ont été enregistrées : cadmium (Cd) 0,423 g/g ; cuivre (Cu) 19 g/g ; zinc (Zn) 76,25 g/g ; fer (Fe) 172,5 g/g. Dans cette étude, les abeilles sont plus contaminées par les métaux que le pollen et le pollen est plus contaminé que le miel.

- Des recherches menées en Pologne ont examiné la concentration des métaux zinc, cuivre, plomb, arsenic et cadmium dans des échantillons de propolis (un spectromètre à plasma a été utilisé). ⁷⁴ Quatre-vingt-dix échantillons ont été prélevés dans 30 ruchers. Chaque échantillon (30 g) a été obtenu en mélangeant la propolis de 3 colonies du même rucher (le laboratoire a utilisé 2 g). Les échantillons ont été prélevés en Pologne en 2010 entre les mois de mai et d'août. Les métaux ont été trouvés dans l'ordre décroissant de concentration suivant : zinc

(Zn)>>cuivre (Cu)>plomb (Pb)>arsenic (As)>cadmium (Cd), aux concentrations moyennes suivantes, en mg/kg, de : 55,79, 8,94, 6,54, 0,698, 0,203 ; et aux concentrations maximales, en mg/kg, de : 115,22 pour le zinc, 18,32 pour le cuivre, 18,29 pour le plomb, 1,81 pour l'arsenic et 0,811 pour le cadmium (dans une autre étude, la présence d'une cimenterie a rendu la concentration maximale de cadmium de 0,795 mg/kg, soit une concentration similaire).⁷⁴ Tous les métaux testés ont des concentrations moyennes supérieures aux limites réglementées pour la propolis en Pologne, sauf pour le cuivre, pour lequel la limite est de 10 mg/kg (*norme polonaise PN 1998*). Les concentrations de plomb et d'arsenic étaient élevées. Les concentrations de ce dernier sont influencées par la présence d'industries métallurgiques et chimiques dans la zone où se trouvaient les ruches : dans cette zone, la concentration d'arsenic dans le sol était de 2.500 mg/kg. Les auteurs recommandent que la propolis soit soumise à des contrôles analytiques avant son utilisation à des fins alimentaires ou pharmacologiques.

- Une étude de surveillance réalisée en 2010 en Turquie a examiné six échantillons de miellat (provenant de *Pinus brutia*) et onze échantillons d'abeilles dans le but de détecter les effets sur les produits apicoles d'une centrale thermique brûlant du charbon et du lignite.³⁰ Les ruches étaient situées entre 11 et 22 km de l'usine. Les échantillons d'abeilles étaient constitués de 20 à 50 abeilles vivantes prélevées lors du retour à la ruche. Cette étude recherche différents métaux et conclut que les abeilles sont un meilleur indicateur de la présence de métaux que le miel de miellat et que les insectes enregistrent les plus fortes concentrations de plomb (jusqu'à 24,1 µg/kg) et de cadmium (jusqu'à 7,7 µg/kg).³⁰

- Il peut être utile, pour économiser du temps et des ressources, d'essayer de prévoir comment les métaux se répartissent dans l'environnement afin de pouvoir identifier plus facilement les matrices où ils se concentrent. Les métaux (par exemple le plomb) libérés dans l'atmosphère peuvent s'accumuler dans le sol, de là dans les plantes et ensuite dans les produits des abeilles. Une étude réalisée en Roumanie en 2009 montre que le plomb dans la ruche est distribué dans l'ordre suivant abeilles butineuses (moyenne de 50,7 mg/kg ; des concentrations plus élevées et jusqu'à 607 mg/kg peuvent être mesurées dans les abeilles mortes) > faux-bourçons (moyenne de 32,7 mg/kg) > propolis (moyenne de 22,2 mg/kg) > cire (moyenne de 21 mg/kg) > larves (moyenne de 17 mg/kg) > miel (moyenne de 14,6 mg/kg) > gelée royale (moyenne de 1 mg/kg).⁷³² La concentration moyenne de plomb dans le sol était de 1.840 mg/kg (bien plus élevée que celle mesurée dans la matrice de la ruche la plus contaminée), la concentration maximale de 12.134 mg/kg et la concentration minimale de 369 mg/kg. Seule une fraction de ce plomb est facilement absorbée par les plantes : entre 1,4% et 13,7%. Les concentrations mesurées dans le pollen varient : 0,12 mg/kg dans *Rubus fruticosus*, 0,14 mg/kg dans *Trifolium repens* et 3,13 mg/kg dans *Lamium album*. Les analyses effectuées sur 13 plantes visitées par les abeilles montrent que les concentrations dans le pollen ou les fleurs sont plus faibles que dans le sol. Ainsi, les concentrations par rapport au sol dans les différentes plantes sont plus faibles : dans le pollen de trèfle blanc (*Trifolium repens*), on mesure des concentrations de 0,2% de celles enregistrées dans le sol ; dans le pollen de châtaignier (*Castanea sativa*), 3% ; dans l'ortie blanche (*Lamium album*), 4% ; dans le lotier corniculé (*Lotus corniculatus*), 9% ; dans l'orpin commun (*Lysimachia vulgaris*), 11%. Dans certains cas, le pollen mesure des concentrations plus élevées que celles mesurées dans les fleurs (par exemple, *Trifolium medium*, *Achillea millefolium*). Les racines enregistrent les plus fortes concentrations, qui peuvent atteindre 43% de celles mesurées dans le sol chez l'ortie blanche. Cette recherche montre que le sol est la matrice la plus contaminée, suivie par les racines des plantes, puis par les abeilles qui butinent. Ainsi, le produit de la ruche qui est le meilleur indicateur de la contamination par le

plomb est le butinage des abeilles, mais les racines des plantes et le sol sont plus susceptibles de fournir des informations car ils contiennent des quantités beaucoup plus élevées de plomb.

- Nous résumons les résultats d'une étude portant sur la présence de 11 métaux (Al, Ca, Cd, Cr, Cu, K, Mg, Mn, Na, Pb et Zn) dans 42 échantillons de propolis (*Apis mellifera*) provenant de deux régions du Brésil (par spectrométrie d'absorption atomique de flamme et atomisation électrothermique ; chacun des 42 échantillons pesait 0,5 g et a été mesuré trois fois).⁶² Les échantillons ont été prélevés de janvier à mars 2011. Aucune ruche ne contenait de pièces métalliques. Les concentrations moyennes enregistrées pour certains métaux étaient les suivantes, en mg/g : aluminium (Al) 0,68 ; calcium (Ca) 1,66 ; potassium (K) 7,59 ; magnésium (Mg) 1,27 ; manganèse (Mn) 0,08 ; sodium (Na) 0,58 et zinc (Zn) 0,02.

Les concentrations les plus élevées ont été mesurées pour les métaux Al, Ca, K, Mg et Na dans tous les échantillons de propolis. Le Mn et le Zn ont été détectés à des concentrations plus faibles.

Les concentrations d'Al, Ca et Mg dans la propolis de différentes régions étaient statistiquement différentes et peuvent potentiellement être utilisées pour déterminer l'origine géographique. Les concentrations moyennes de Cd, Cr et Pb, qui sont des indicateurs de la présence de contamination, étaient respectivement de 0,13, 5,53 et 9,85 µg/g. Les concentrations de ces trois métaux fournissent également des informations sur l'origine géographique de la propolis.

La concentration de plomb, selon la norme britannique pour les denrées alimentaires, doit être inférieure à 1 mg/kg ; cette référence est inférieure à la limite proposée par le *Codex Alimentarius* de 2 mg/kg. Lors de recherches menées en Espagne, la plus forte concentration de plomb enregistrée était de 3,8 mg/kg ; en Pologne, on a mesuré jusqu'à 3,28 mg/kg de plomb et 10,96 mg/kg de Cu ; en Chine, on a trouvé du Pb jusqu'à 19,92 mg/kg et du Cd jusqu'à 0,6 mg/kg.⁶² Le chrome a été trouvé jusqu'à 3,5 mg/kg dans une étude menée en Argentine sur la propolis. Le cadmium et le plomb peuvent provenir des engrais, des eaux usées, des effluents industriels et des combustibles fossiles, par le biais des dépôts atmosphériques. La dose hebdomadaire tolérable qu'un adulte de 60 kg peut ingérer a été proposée comme étant de 25 µg par kg de poids corporel pour le plomb et de 7 µg par kg de poids corporel pour le cadmium. L'ingestion de 1 g de propolis par jour peut entraîner, aux concentrations mesurées dans ce travail, jusqu'à 5% de la dose de plomb sûre pour un adulte de 60 kg.⁶² Ainsi, la propolis est fortement contaminée par les métaux.

Les auteurs concluent que la teneur en métaux de la propolis peut être utilisée pour discriminer l'origine géographique car les concentrations reflètent celles du sol et des plantes.

- Une étude a examiné la concentration de 14 éléments dans le sol, dans des échantillons de fleurs et de miel de tournesol (*Helianthus annuus*) et d'acacia (*Robinia pseudoacacia*) dans cinq régions de Hongrie sans zones industrielles ni routes à fort trafic (travaux réalisés en 2015).⁴⁴ Les échantillons de miel ont été choisis au hasard en sélectionnant 5 ruches par station au hasard (les échantillons étaient composés de 100 g de miel). Une forte corrélation entre la concentration mesurée dans le sol et celle détectée dans le miel a été mise en évidence, avec l'ordre décroissant de probabilité suivant : cuivre (Cu) > baryum (Ba) > strontium (Sr) = nickel (Ni) > zinc (Zn) > manganèse (Mn) = plomb (Pb) > arsenic (As). Dans les deux plantes suivies (tournesols et acacias), la bioconcentration des métaux dans le miel était similaire. Le miel de tournesol avait des concentrations plus élevées de bore (B), de baryum (Ba), de cuivre (Cu), de fer (Fe), de plomb (Pb), de strontium (Sr), de zinc (Zn) et des concentrations plus faibles de nickel que le miel d'acacia. Les micro-éléments sont présents dans le miel d'acacia dans l'ordre croissant de concentration suivant molybdène (Mo) < plomb (Pb) < arsenic (As) < baryum (Ba) < nickel (Ni)

< strontium (Sr) < cuivre (Cu) < manganèse (Mn) < fer (Fe) < zinc (Zn) < bore (B) ; tandis que ceux mesurés dans le miel de tournesol étaient : Mo<Cd<Co<Ni<Pb<As<Ba<Sr<Cu<Mn<Fe<Zn<B. ⁴⁴ On remarque que l'ordre des 5 derniers éléments est identique.

Pour les macro-éléments, la corrélation enregistrée entre la concentration mesurée dans le sol et celle mesurée dans le miel a été la plus évidente dans le cas du potassium, du soufre et du phosphore. Dans le miel d'acacia, les macro-éléments ont montré l'ordre croissant de concentration suivant : magnésium (Mg) < sodium (Na) < soufre (S) < phosphore (P) < potassium (K) ; tandis que le miel de tournesol a montré les résultats suivants Na<Mg<S<P<K. Cette étude conclut que le miel peut être utilisé pour obtenir des informations sur les concentrations de cuivre et de baryum dans le sol, et pour obtenir des informations sur la présence de strontium, de nickel, de zinc, de manganèse, de plomb et d'arsenic. Le baryum est le seul élément qui est plus concentré dans le miel que dans le sol.

Les fleurs d'acacia bioconcentrent plus de 14 fois plus de potassium, 11 fois plus de phosphore, 8 fois plus de soufre, 5 fois plus de bore et 3 fois plus de molybdène que les concentrations enregistrées dans le sol, elles peuvent donc être utilisées pour obtenir des informations sur ces métaux dans le sol. Les fleurs de tournesol bio-concentrent également le bore plus de 22 fois, le soufre plus de 8 fois, le potassium plus de 6 fois, le phosphore et le molybdène plus de 3 fois par rapport aux concentrations enregistrées dans le sol. Cette étude révèle que la concentration de certains métaux mesurée dans les fleurs d'acacia et de tournesol est un meilleur indicateur du miel. La recherche de ces métaux dans les fleurs peut facilement fournir des informations sur le niveau de contamination du sol, car elles les bioconcentrent.

- Une recherche a examiné les concentrations de certains métaux (As, Al, Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Pb et Zn) à l'intérieur et à l'extérieur du corps d'abeilles mortes provenant de colonies situées dans des zones urbaines et rurales en Pologne (article publié en 2018). ⁴⁷ Les abeilles mortes recueillies au fond des ruches ont été utilisées (5 abeilles mortes par échantillon). Certains métaux tels que le zinc et le chrome se trouvent principalement sur la surface extérieure du corps des abeilles, tandis que le plomb se trouve à l'intérieur (par exemple : chez les abeilles situées à proximité de zones industrielles). Le cadmium peut être enregistré dans l'hémolymphe de l'insecte. Le plomb et le cadmium peuvent être utilisés comme marqueurs de la présence d'activités industrielles et d'urbanisation. Des éléments tels que le cuivre (Cu), le manganèse (Mn), l'arsenic (As) et l'aluminium (Al) sont également des composants de pesticides tels que les insecticides ou les fongicides, ce qui peut constituer une autre source de contamination.

Les recherches montrent que les plus fortes concentrations d'arsenic (As), d'aluminium (Al), de plomb (Pb) et de cadmium (Cd) se trouvent dans les colonies situées dans les zones urbaines. L'aluminium (Al), l'arsenic (As) et le chrome (Cr) se retrouvent plus facilement sur la surface extérieure du corps des abeilles mortes et le cadmium à l'intérieur du corps (le cadmium se retrouve également sur la surface extérieure).

QUELQUES RÉSULTATS ITALIENS SUR LA SURVEILLANCE DES MÉTAUX DANS LES PRODUITS APICOLES

Les résultats de certains contrôles, effectués en Italie, sur la présence de métaux dans les produits apicoles sont résumés.

- En Italie, des échantillons de miel, de butineuses, de larves et de pollen ont été examinés pour déterminer les concentrations de plomb, de chrome, de nickel et de cadmium. ⁶⁹

Les colonies ont été localisées dans cinq sites de la région de Modène et les recherches ont été menées de 1987 à 1989. Chaque station d'échantillonnage était composée de 2 ruches, situées dans des zones urbaines caractérisées par un trafic intense de véhicules. Les échantillons ont été prélevés une fois par mois, entre avril et septembre. Le pollen était collecté auprès des abeilles lorsqu'elles revenaient à la ruche. Les rapports obtenus en divisant les mesures effectuées dans les échantillons de miel (concentration médiane en $\mu\text{g}/\text{kg}$) avec les concentrations mesurées par les stations de surveillance de l'air (concentration médiane en $\mu\text{g}/\text{m}^3$) sont les suivants : ⁶⁹

- 1.000-2.000 pour le plomb et le nickel ;
- 2.000-4.000 pour le chrome ;
- 3.000-5.000 pour le cadmium.

Les auteurs de cet article concluent que le miel peut être utilisé pour obtenir des informations sur la pollution atmosphérique.

- Des mesures de plomb dans des ruches situées dans une zone polluée de la municipalité de Portogruaro (province de Venise) ont révélé des concentrations de 1,84 ppm dans le miel, 13,7 ppm dans la propolis et 13,1 ppm dans la gelée royale. ¹⁷

- Des travaux menés en Italie ont examiné les concentrations de métaux (mercure ou Hg, chrome ou Cr, cadmium ou Cd et plomb ou Pb) dans des abeilles prélevées de leur vivant (*Apis mellifera*). ⁶⁵ Les recherches ont été menées de mai à octobre 2007 sur deux sites, l'un dans le Latium et l'autre dans les Abruzzes. Quatre ruchers étaient situés dans la Riserva dei Calanchi di Atri dans les Abruzzes, deux étaient situés près d'une route très fréquentée, un rucher était situé près d'un aéroport (aéroport de Ciampino à Rome) et un rucher était situé dans une zone urbaine avec la présence d'un incinérateur. Les colonies ont donc été soumises à différentes sources de contamination. Chaque station d'échantillonnage était composée de trois ruches avec 10 rayons chacune. Les 24 ruches utilisées étaient en bois et aucune fumigation n'a été effectuée. Les abeilles vivantes ont été échantillonnées pendant la journée et seules les abeilles ouvrières nettoyyées du pollen ont été utilisées (les échantillons d'abeilles étaient de 2 g chacun). Quelques résultats sont résumés : ⁶⁵

- Aucun des échantillons ne contenait de mercure.
- Le plomb (concentration moyenne de 0,52 mg/kg) et le cadmium sont à des concentrations plus élevées près de l'aéroport.
- Le cadmium se trouve à de faibles concentrations, sans différences significatives entre les sites. Il est donc également présent dans les réserves naturelles. À cet égard, il est important de remarquer que 85% à 90% du cadmium présent dans l'atmosphère est d'origine anthropique, car il peut résulter de la combustion de combustibles fossiles, des raffineries et de l'incinération des déchets.
- Le chrome est l'élément trouvé aux plus fortes concentrations moyennes (0,97 mg/kg en août) et absolues (de 5,07 mg/kg).

Cette étude conclut qu'il n'est pas possible d'obtenir des informations sur la bioaccumulation des métaux en examinant leur teneur dans les abeilles.

- Une étude réalisée en Sardaigne a examiné la présence de métaux (cadmium ou Cd, chrome ou Cr et plomb ou Pb) dans les produits apicoles (chaque analyse a été effectuée en trois exemplaires, en utilisant la technique de la spectrométrie d'absorption atomique). ⁷² Il existe sur le site une mine qui a fourni du plomb et du zinc pendant plus de 130 ans (de 1848 à 1980). Au moment de la recherche, la mine est déclassée et abandonnée et le zinc n'est pas étudié dans cette étude. Le cadmium, le chrome et le plomb ont été recherchés dans le sol, l'eau du robinet, les abeilles butineuses, le miel et le pollen dans des échantillons collectés pendant trois ans (2007-2009). Trois ruches ont été utilisées à chaque station de surveillance ; une station de

surveillance était située près de la mine et une autre à 50 km (à l'Université de Sassari). Les échantillons d'abeilles étaient composés de 50 abeilles prélevées sur chaque colonie, soit 150 abeilles par station. Le miel a été prélevé dans les cellules contenant du miel non mûr (4 g par ruche, soit 12 g par station de contrôle). Le pollen a été collecté auprès des abeilles butineuses à l'aide de systèmes mécaniques spéciaux, qui ont été placés une semaine avant l'échantillonnage. Les échantillons ont été prélevés en mars, mai, juillet et novembre.

Les analyses du cadmium et du plomb dans l'eau du site de contrôle ont enregistré des concentrations très faibles, inférieures à la limite de quantification, alors que des concentrations élevées ont été enregistrées dans la zone de la mine. En détail, les limites pour l'eau potable en Italie, 5 µg/L pour le cadmium et 10 µg/L pour le plomb, ont été dépassées sur les deux sites contrôlés dans la zone de la mine (de 268 fois pour le cadmium et 137 fois pour le plomb). Les concentrations de métaux dans le sol du site minier et dans les abeilles élevées à proximité de la mine étaient toujours (significativement) plus élevées que celles des échantillons de contrôle. L'utilisation des abeilles pour surveiller les métaux dans ce cas fonctionne en comparant les ruches de contrôle avec les ruches situées sur le site contaminé. La mesure des métaux dans le sol fournit de meilleures informations car les concentrations sont beaucoup plus élevées : ⁷²

- 2.000 fois plus élevé pour le plomb mesuré dans un sol contaminé que pour le pollen, qui contient la plus grande quantité de plomb parmi les produits apicoles ;
- 7 fois plus pour le chrome dans le sol que pour les abeilles, dont la concentration est la plus élevée parmi les produits apicoles ;
- 3 fois plus pour le cadmium dans le sol que pour le cadmium dans les abeilles, dont la concentration est la plus élevée parmi les produits apicoles.

Le miel est toujours la matrice la moins contaminée et ne constitue donc pas un bon indicateur de la présence de métaux car il ne les accumule pas. Aucun des échantillons apicoles ne bioaccumule les métaux examinés, les concentrations étant toujours inférieures à celles de l'environnement (dans cette recherche, on n'a pas évalué les concentrations de métaux dans la propolis et la cire). Les auteurs soulignent qu'il n'existe pas de concentrations maximales réglementées pour ces métaux dans le miel. Ils mentionnent également certaines limites maximales admissibles proposées par l'Europe pour le miel : 1 mg/kg pour le plomb et 0,1 mg/kg pour le cadmium. Les échantillons de miel examinés dans cette étude ne dépassent pas ces limites. Les auteurs concluent que les abeilles vivantes sont un meilleur indicateur de la contamination de ces trois métaux que le pollen et le miel, car les concentrations sont mieux corrélées avec celles mesurées dans le sol. Les abeilles situées sur le site contaminé enregistrent des concentrations de métaux significativement plus élevées que celles situées sur le site de comparaison. En conclusion, il est préférable de rechercher ces contaminants directement dans le sol, sauf si l'on veut évaluer un risque pour la sécurité alimentaire ou la santé des abeilles.

Au cours de ces travaux, la biodiversité des fourmis présentes sur le site de la mine et sur un site témoin situé à proximité a été mesurée. Les fourmis ont été capturées tous les 15 jours à partir du mois de mai, à l'aide de pièges placés aux sommets d'un carré de 12 m de côté. ⁷² Au total, 37 espèces de fourmis ont été classées.

- En 2008-2010 (trois ans), une biosurveillance a été réalisée dans 10 réserves naturelles de la région des Marches. ³³ Vingt-deux colonies ont été utilisées sur 11 sites, à partir desquels du miel, des abeilles vivantes (100 abeilles pour chaque échantillon) et des abeilles mortes ont été échantillonnées pendant les mois de mai à octobre. Les abeilles mortes, qui sont les individus retirés de la ruche par les insectes eux-mêmes, ont été collectées à l'aide de pièges spéciaux placés dans la ruche.

Les concentrations les plus élevées ont été enregistrées pour le chrome, suivi du cadmium et du plomb ; les métaux rejetés dans l'atmosphère ont été la source la plus probable de contamination, bien que 24% des eaux souterraines aient été contaminées par le chrome, le cadmium et le

plomb. Les lichens ont été utilisés pour surveiller la pollution atmosphérique dans les mêmes zones et ont révélé la présence d'une contamination au cadmium, au chrome, au plomb et au nickel. Les concentrations de chrome ont augmenté en octobre, ce qui suggère une source anthropique.

On a également recherché un certain nombre de pesticides qui n'ont pas été trouvés (30 organophosphorés, 13 pyréthroïdes et 16 triazoles).³³

Dans cette étude, le miel ne semble pas être un bon indicateur de la contamination par les métaux ou même par les pesticides.

- L'examen de la teneur en plomb des miels italiens a montré que la concentration maximale autorisée (0,1 mg/kg) était dépassée dans 4,2% des échantillons prélevés en 2012 et dans 1% des échantillons prélevés en 2015.³⁵

- Une étude menée en Italie, à Trieste, a utilisé des colonies d'*Apis mellifera ligustica* pour surveiller la présence de métaux sur deux sites, l'un urbain et l'autre suburbain, où se trouvent une fonderie de fer et un incinérateur.⁶⁴ Des ruchers d'apiculteurs volontaires ont été utilisés et des échantillons ont été prélevés en juin 2015. Les échantillons étaient constitués d'abeilles vivantes prélevées dans des ruches en bois à 10 cadres. 11 métaux ont été identifiés dans deux ordres différents de concentration décroissante :

- dans les abeilles butineuses de la zone suburbaine : Zn (zinc) > Cu (cuivre) > Sr (strontium) > Bi (bismuth) > Ni (nickel) > Cr (chrome) > Pb (plomb) = Co (cobalt) > V (vanadium) > Cd (cadmium) > As (arsenic) ;
- dans les abeilles de la zone urbaine : Zn > Cu > Sr > Cr > Ni > Bi > Co = V > Pb > As > Cd.

Dans tous les échantillons, les concentrations de zinc, cuivre, strontium, nickel, chrome et bismuth étaient les plus élevées. Dans la zone urbaine, les plus fortes concentrations de zinc, cuivre, strontium, nickel et chrome ont été enregistrées. Les concentrations enregistrées dans la zone urbaine sont les suivantes : As 0,027 µg/g, Bi 0,416 µg/g, Cd 0,024 µg/g, Co 0,135 µg/g, Cr 0,465 µg/g, Cu 17,93 µg/g, Ni 0,425 µg/g, Pb 0,113 µg/g, Sr 1,9 µg/g, V 0,13 µg/g et Zn 58,11 µg/g.

Cette étude révèle que les abeilles situées dans la zone urbaine contiennent des concentrations plus élevées de chrome et de cuivre, et des concentrations plus faibles de cadmium. Le chrome et le cuivre ont donc été associés à l'exposition au trafic urbain et le cadmium aux émissions industrielles.

- Les métaux atmosphériques tels que le plomb peuvent se retrouver dans les abeilles à des concentrations élevées. Une étude menée à Milan (présentée en 2017) révèle des concentrations atmosphériques de plomb de 4 ng/m³ et, dans le même temps, des concentrations de 0,7 mg/kg de plomb chez les abeilles ; des concentrations atmosphériques de plomb de 15 ng/m³ ont enregistré 0,9 mg/kg chez les abeilles.¹⁹⁶

- Des travaux menés en Italie ont étudié la présence de poussières fines dans des abeilles vivantes collectées dans des ruches situées à proximité d'une usine de béton et de routes très fréquentées (article publié en 2018).⁶³ La poussière fine est très dangereuse pour la santé humaine et la poussière ultrafine peut pénétrer dans le cerveau directement par le bulbe olfactif. La production de ciment est l'une des activités industrielles qui produit des poussières fines à presque toutes les étapes du processus (concassage, homogénéisation, chauffage à environ 1.450 °C, etc.) La cimenterie étudiée occupe 61.000 m² et produit 900.000 t/an de résidus imbrûlés. De nombreuses substances dangereuses, comme les métaux, peuvent être présentes dans la poussière. Pour contrôler la présence de poussières fines, on a utilisé des abeilles vivantes de la

province de Piacenza, qui ont été élevées à une distance de 800 m de la cimenterie. On a également utilisé un rucher situé à 7 km de la cimenterie, qui était exposé aux routes passantes voisines. Dans cette étude, la poussière a été examinée avec un microscope électronique à balayage (MEB) sur la surface externe du corps des abeilles butineuses. Les abeilles ont été collectées à midi, pendant les journées ensoleillées, lorsque la température était d'environ 19°C. Dans la publication, plusieurs photos prises au microscope électronique montrent la présence de substances dans différentes parties de la surface extérieure du corps des abeilles butineuses (ailes, tête, poils). Les métaux détectés dans la substance inorganique sur la surface extérieure du corps des insectes sont notamment Pb, Cu, Ti, Bi, Cr, Mn, Sn et Zn, ainsi que Si, Al, Na, K, Fe, Ca, Mg, Ba, Zr et S.⁶³

Du carbonate de calcium et des agrégats de Bi, Cr, Cu, Mn, Sn, Zn et Pb ont été observés à la surface des abeilles situées à proximité de la cimenterie, et ceux-ci provenaient sans aucun doute de cette activité.

Certains métaux tels que Cr, Cu, Zn, Pb et le sulfate de baryum (BaSO₄), qui sont générés par le transport routier (par exemple les pneus et les freins), ont été trouvés à la surface des abeilles situées près des routes et loin de la cimenterie.

Des cristaux d'oxalate de calcium sont également détectés au microscope à la suite des traitements contre le *Varroa* effectués par les apiculteurs.

DÉTECTION DE LA RADIOACTIVITÉ

Les abeilles sont utilisées depuis longtemps pour surveiller la présence de substances radioactives produites par l'invention de l'énergie atomique, car elles constituent un bon échantillonneur naturel des différents isotopes. Dans le but de mesurer l'augmentation de la radioactivité générée par les expériences nucléaires (en particulier l'isotope du strontium : ⁹⁰Sr), les abeilles ont probablement été utilisées pour la première fois dans les années 1950.¹⁷

Il a été démontré que le miel peut bioaccumuler le cobalt (⁶⁰Co) et le sodium (²²Na) provenant de l'eau contaminée présente sur le site visité par les abeilles plutôt que des fleurs. Les concentrations mesurées dans le miel sont plus élevées que celles trouvées dans l'eau contaminée : environ 50 fois pour le cobalt (⁶⁰Co) et 30 fois pour le sodium (²²Na). Les abeilles butineuses, c'est-à-dire celles qui sortent pour patrouiller et chercher de l'eau et de la nourriture, sont celles qui sont contaminées en premier.

Dans toute l'Europe, les abeilles ont été utilisées pour surveiller la propagation des polluants produits suite à l'accident de Tchernobyl (Ukraine) le 26 avril 1986.¹¹⁸ L'explosion du réacteur nucléaire a libéré divers isotopes (tels que le xénon, l'iode, le césium, le tellure, le strontium, le baryum, le zirconium, le molybdène, le ruthénium, le césium, le neptunium, le plutonium et le curium). Parmi les plus dangereux, on trouve les isotopes d'iode, de césium et de strontium. L'iode est fixé dans la glande thyroïde, ce qui augmente le risque de cancer, tandis que le césium et le strontium sont incorporés dans les tissus en tant qu'homologues du potassium et du calcium respectivement. L'explosion a emporté ces substances dangereuses à plus d'un kilomètre dans l'atmosphère, leur permettant de se répandre dans tout l'hémisphère nord. Une augmentation de la radioactivité a été enregistrée en Europe, aux États-Unis, au Canada et au Japon.

La demi-vie de l'isotope 134 du césium est d'environ 2 ans (2,06), tandis que celle de l'isotope 137 est de 30,17 ans. La présence de ces deux isotopes est la conséquence d'essais nucléaires (bombes) ou d'accidents comme celui de Tchernobyl. En France, ces deux isotopes du césium (¹³⁴Cs et ¹³⁷Cs) ont été utilisés pour mesurer la variation de la radioactivité.¹⁷ Le miel a enregistré la présence de ces isotopes, indiquant une augmentation de la radioactivité de loin et à de faibles concentrations. Le miel de miellat présentait les niveaux les plus élevés de radioactivité, ce qui est prévisible car la chaîne alimentaire a bioaccumulé les isotopes d'abord

dans les plantes, puis dans les pucerons et enfin dans les abeilles, augmentant ainsi leur concentration. Le miel de miellat est donc un bioindicateur possible et peut être utilisé pour surveiller la variation des niveaux de contamination radioactive sur de vastes zones. Dans les miels multif floraux (millefiori), la concentration peut être très variable en fonction de plusieurs facteurs tels que les différences entre les plantes (par exemple, le miel de châtaignier semble se bioaccumuler davantage que le miel d'acacia).

La présence de césium (isotope ^{137}Cs) enregistrée à la suite de l'accident de Tchernobyl a également été surveillée en Croatie. ¹⁷ La radioactivité n'est pas uniformément répartie dans l'environnement et, en Croatie, la différence de radioactivité entre les sols les plus contaminés et les moins contaminés était jusqu'à 50 fois supérieure. Ces différences peuvent être dues au climat (intensité des précipitations) et aux caractéristiques physiques et chimiques du sol. Une augmentation de la radioactivité a également été enregistrée en Croatie après l'accident de 1986, tant dans les échantillons de tissus végétaux que dans le miel. La radioactivité (^{134}Cs) mesurée dans le miel, après 10 ans, était devenue beaucoup plus faible et souvent non mesurable. Dans cette étude, le miel s'est révélé être une bonne matrice biologique pour détecter la présence et la variation dans le temps d'isotopes radioactifs à distance et à faible concentration. De plus, il est confirmé que le miel de miellat est un meilleur indicateur, puisque la radioactivité enregistrée est plus élevée, que les miels de nectar (^{137}Cs). Le miel de bruyère¹ s'est révélé être un excellent indicateur de la contamination par le césium radioactif (^{137}Cs). La mesure de cet isotope dans le miel permet de détecter ce qui s'est passé il y a longtemps, car sa demi-vie est de 30 ans, de sorte que sa concentration dans l'environnement reste constante pendant une longue période. Ces travaux concluent que le miel de miellat provenant de ruches situées à proximité de forêts de sapins et de conifères peut être utilisé pour surveiller le césium, le chrome, le rubidium, le cuivre, le plomb et le nickel. ¹⁷ Toujours en Italie, les résultats de la biosurveillance des isotopes radioactifs confirment la possibilité d'utiliser le miel de miellat pour déterminer la présence d'isotopes radioactifs (^{137}Cs et ^{134}Cs) et identifient également le pollen comme un indicateur possible de la variation de la présence de radioactivité dans l'environnement. ¹⁷

SURVEILLANCE DE LA CONTAMINATION PAR LES MÉTAUX À L'AIDE DE FOURMIS

D'autres insectes, comme les fourmis, peuvent être utilisés pour surveiller la contamination par les métaux. Une étude menée à Prato, en Italie, et publiée en 2013 a examiné la capacité à bioconcentrer six métaux (cuivre, cadmium, nickel, manganèse, plomb et zinc) chez une fourmi répandue dans la région méditerranéenne. ⁷³⁴ *Crematogaster scutellaris* est une fourmi appartenant à la sous-famille des Myrmicinae. Sa tête ovoïde, rougeâtre, contraste avec le reste de son corps, de couleur noirâtre. ⁷³⁵ Il possède un dard qui peut libérer un venin répulsif. Ces fourmis préfèrent nicher dans le bois, sous l'écorce des arbres, avec une préférence pour les oliviers, les pins (*Pinus pinea*, *Pinus nigra*) et les chênes. C'est un prédateur vorace de petits invertébrés, mais il peut aussi se nourrir d'insectes morts ; on le trouve aussi souvent associé à des colonies de pucerons, dont le miellat est une source de substances sucrées. En raison de son activité prédatrice, il a été étudié comme un outil possible de lutte biologique contre la processionnaire du pin (*Thaumetopoea pityocampa*). L'espérance de vie de la colonie, composée de milliers d'insectes, peut être supérieure à 10 ans, dépassant ainsi celle de nombreux autres invertébrés.

¹ La bruyère (*Calluna vulgaris*) est une plante herbacée, vivace, à feuilles persistantes et en forme d'aiguille. ¹⁰⁵

La recherche de métaux dans le sol et dans le corps des insectes a donné les résultats suivants :

- Les métaux s'accumulent dans l'abdomen de l'insecte plutôt que dans la tête ou le thorax. Cela se produit également chez les abeilles.⁷⁵⁰
- Les concentrations de métaux trouvées dans les fourmis reflètent les niveaux de contamination environnementale enregistrés sur les différents sites.
- Chez les fourmis, les concentrations de zinc et de cadmium étaient plus élevées que celles enregistrées dans le sol. Ainsi, ces deux métaux sont bioconcentrés et permettent de proposer les fourmis comme bioindicateurs.
- Le cuivre, le nickel, le manganèse et le plomb étaient plus concentrés dans le sol que dans les fourmis.

En surveillant la présence et le nombre de fourmis, il est possible d'obtenir des informations sur l'état de santé de l'écosystème agricole, car les pratiques agronomiques ne permettent généralement pas leur survie. Le mouvement du sol (par exemple, le labourage), l'absence de zones semi-naturelles pour se réfugier et l'absence de nourriture comme d'autres insectes (par exemple, à cause des insecticides) sont dévastateurs pour les fourmis.

LA SURVEILLANCE D'AUTRES POLLUANTS, MICRO-ORGANISMES ET MALADIES

BIOSURVEILLANCE DES HYDROCARBURES AROMATIQUES POLYCYCLIQUES DANS LES VÉGÉTAUX

Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) sont des contaminants organiques largement présents dans l'environnement.³⁶ Ils sont formés par la combustion incomplète de matières organiques, notamment le bois et les combustibles fossiles tels que le charbon et le pétrole, et sont des composants des particules. Ils sont également produits par les raffineries, les incinérateurs de déchets et sont présents dans la fumée de tabac, et sont également générés par les éruptions volcaniques et les feux de forêt. Ces substances peuvent facilement se déplacer dans l'air sur de longues distances. Les êtres vivants peuvent les absorber en les respirant, en les touchant et en les ingérant. Les particules fines peuvent également résulter de réactions photochimiques et de processus d'oxydation ; dans ce cas, on parle de poussières secondaires.

La législation exige la mesure des particules totales en suspension et des PM₁₀. PM est l'abréviation de *Particulate Matter* (*matière particulaire*) et le chiffre à côté indique le diamètre (aérodynamique), en millièmes de millimètre (micro-mètres ou millièmes de mètre : μm). Plus le diamètre de ces particules est petit, plus elles sont dangereuses. Les particules d'un diamètre inférieur à 2,5 μm atteignent facilement les parties les plus profondes des poumons et pénètrent dans la circulation sanguine. La plus petite fraction est donc la plus dangereuse et peut contenir des substances cancérogènes, comme certains hydrocarbures aromatiques polycycliques générés par les moteurs diesel.

La famille des HAP comprend plusieurs centaines de composés très hétérogènes constitués de deux ou plusieurs cycles benzéniques.⁵⁹ Certains de ces composés ne sont constitués que d'hydrogène et de carbone, d'autres contiennent également des atomes tels que l'azote et le soufre. Les HAP sont généralement toxiques, mutagènes et cancérogènes.⁶⁶ 16 types de HAP ont été identifiés comme très dangereux par l'Agence américaine de protection de l'environnement (EPA).⁵⁹ En Europe, 15 molécules appartenant aux HAP sont considérées comme les plus importantes. Le Comité scientifique de l'alimentation humaine a conclu dans son avis du 4 décembre 2002 que plusieurs HAP sont cancérogènes, génotoxiques, persistants, lipophiles et bioaccumulatifs.^{60, 849} Les substances les plus toxiques sont probablement les molécules qui ont quatre à sept cycles. Le composant le plus étudié est le benzo(a)pyrène (BaP), un composé à cinq anneaux très toxique, à tel point qu'il est utilisé pour représenter l'ensemble du groupe des HAP dans la pollution environnementale. En Europe, le benzo(a)pyrène peut être utilisé comme marqueur de la présence et de l'effet dans les aliments des HAP cancérogènes (notamment le benzo(a)anthracène, le benzo(b)fluoranthène, le benzo(j)fluoranthène, le benzo(k)fluoranthène, benzo(g,h,i)pérylène, chrysène, cyclopenta(c,d)pyrène, dibenz(a,h)anthracène, dibenzo(a,e)pyrène, dibenzo(a,h)pyrène, dibenzo(a,i)pyrène, dibenzo(a,l)pyrène, indeno(1,2,3-cd)pyrène et 5-méthylchrysène).⁸⁴⁹ D'autres molécules importantes, en raison de leur caractère mutagène et cancérogène, sont l'anthracène, le fluoranthène, le pyrène et leurs dérivés.

Les jours de brouillard, les concentrations les plus élevées peuvent être enregistrées. Ils peuvent se bioaccumuler dans les plantes et entrer dans la chaîne alimentaire. Dans les zones urbaines, les valeurs les plus élevées sont observées pendant les mois d'hiver (valeurs comprises entre 1,5

et 11 ng/m³) et les plus faibles pendant la période estivale (0,15-0,68 ng/m³). Dans les sols urbains, les HAP peuvent atteindre des concentrations très élevées (20.060 ng/g).³⁸

Le principal risque sanitaire associé aux hydrocarbures aromatiques polycycliques est leur capacité à induire le cancer. Le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC) classe certains HAP comme cancérogènes possibles et d'autres comme cancérogènes probables. Parmi ceux-ci, le benzo(a)pyrène (BaP) est le composant le plus étudié en raison de sa large distribution dans l'environnement et de sa haute toxicité. Chaque augmentation de 1 ng/m³ de benzo(a)pyrène dans l'atmosphère peut entraîner un risque de 9 nouveaux cas de cancer pour 100.000 personnes. Le benzo(a)pyrène peut également contaminer l'eau à partir du goudron de houille utilisé pour sceller les réservoirs de stockage. La plupart des HAP sont capables de provoquer le cancer chez les animaux de laboratoire (par exemple, par inhalation). En plus de la respiration, une voie d'exposition importante pour l'homme est l'ingestion de produits agricoles et d'élevage qui ont bioconcentré ces molécules.

De nombreux organismes ont été utilisés comme bio-indicateurs de la contamination par les HAP, notamment les poissons et les mollusques pour le milieu aquatique et les mousses, les lichens et les conifères pour le milieu terrestre.⁵⁹ Les conifères peuvent absorber les HAP présents dans l'air, le sol et l'eau. Les jeunes aiguilles de pin ont été utilisées comme bio-indicateurs de la présence de ces substances.

Les mousses sont particulièrement adaptées à la surveillance du dépôt de polluants de l'atmosphère pour plusieurs raisons. Chez les mousses (par exemple *Hylocomium splendens*), l'absorption des nutriments et de l'eau se fait par les précipitations atmosphériques et non par le sol. L'avantage d'utiliser les mousses pour détecter les métaux ou les hydrocarbures aromatiques polycycliques est qu'elles les accumulent, ce qui facilite la détermination analytique. Les aiguilles de conifères, les feuilles de plantes à feuilles caduques et les lichens ont également été utilisés pour surveiller la contamination environnementale par les hydrocarbures aromatiques polycycliques (et les métaux). En examinant les différentes concentrations de différents hydrocarbures aromatiques polycycliques, il est possible de déterminer quelles sont les principales sources.

Des travaux menés en Espagne ont permis de surveiller la contamination environnementale par les hydrocarbures aromatiques polycycliques à l'aide de mousses.⁷⁵⁹ La concentration moyenne de 13 hydrocarbures aromatiques polycycliques mesurée dans les mousses (*Hylocomium splendens*) était de 133 ng/g. Les concentrations augmentent en hiver, comme on peut s'y attendre, car la combustion augmente et la dégradation photochimique est moins intense qu'en été. Le taux de dépôt moyen de 6 hydrocarbures aromatiques polycycliques était d'environ 166 ng/m/jour², ce qui équivaut à environ 606 g/ha/an. Il s'agit d'un niveau de contamination caractéristique des zones rurales.

Une étude menée en Italie a permis de surveiller les hydrocarbures aromatiques polycycliques dans l'atmosphère en mesurant les concentrations dans une espèce de lichen, qui est une association symbiotique entre des champignons et des algues (*Pseudevernia furfuracea*). Les concentrations enregistrées en hiver étaient beaucoup plus élevées que celles enregistrées en été ; en détail, pendant l'été, les concentrations variaient de 48 à 272 ng/g (matière sèche), alors que pendant l'hiver elles variaient de 289 à 1.575 ng/g (matière sèche).⁸⁵² Cette étude confirme que les lichens bioaccumulent les hydrocarbures aromatiques polycycliques et qu'ils ont une mémoire rétrospective d'environ 45-60 jours.

BIOSURVEILLANCE DES HYDROCARBURES AROMATIQUES POLYCYCLIQUES DANS LES PRODUITS APICOLES

Voici les résultats de certains contrôles qui ont étudié la contamination environnementale par les HAP à travers les produits apicoles.

- Pour la surveillance des HAP, des abeilles mortes et du miel ont été échantillonnés en Italie (2003-2004).³⁸ Les concentrations de benzo(a)pyrène (HAP cancérigène) mesurées dans une zone industrielle étaient les suivantes : entre 0,14 et 0,18 µg/kg dans les abeilles mortes et entre 0,27 et 1,54 µg/kg dans le miel frais.

- Des recherches menées en Turquie ont mesuré la présence de naphthalène dans le miel et ont indiqué que 80,4% des 100 échantillons étaient contaminés par cette substance à une concentration moyenne de 1 µg/g (article publié en 2012).⁴¹ Dans cette publication, il est souligné que la cire est une matrice utile pour étudier cette molécule et d'autres, comme les polychlorobiphényles (PCB), provenant des réfrigérants, des huiles de moteur et des lubrifiants.

- Une étude réalisée en Turquie en avril-mai 2014 a permis de surveiller les hydrocarbures aromatiques polycycliques dans des échantillons d'abeilles ouvrières vivantes, de propolis et d'aiguilles de pin provenant de 5 stations situées dans une zone industrielle, une zone rurale et un site avec une autoroute.⁵⁹ Des échantillons ont également été prélevés dans une zone caractérisée par la présence d'une industrie pétrochimique, d'usines de traitement de l'acier et du fer, d'entreprises de démolition de navires, d'une centrale électrique au charbon et au gaz et d'un dépôt pétrolier. Un chromatographe en phase gazeuse avec un détecteur FID (ionisation de flamme) a été utilisé pour la mesure. Pendant la période d'échantillonnage d'abeilles vivantes, aucun fumigène n'a été utilisé pour inspecter les ruches et aucun traitement avec des pesticides ou autres produits chimiques n'a été autorisé. Cinquante grammes d'abeilles vivantes ont été prélevés dans chaque ruche. Les abeilles ont été nettoyées du pollen avant d'être utilisées. Les aiguilles ont été prélevées sur 25-30 arbres pour chaque échantillon de conifères.

Les concentrations enregistrées de HAP varient entre 261,18 µg/kg et 553,33 µg/kg de matière sèche dans les échantillons d'abeilles vivantes, entre 138,57 et 853,67 µg/kg ss dans les échantillons de feuilles de pin et entre 798,61 et 2.905,53 µg/kg ss dans les échantillons de propolis. Ainsi, la propolis présente les concentrations les plus élevées, suivie des feuilles de pin et enfin des abeilles vivantes. Dans les abeilles, les HAP avec différents numéros d'anneau ont montré le gradient de concentration suivant 5>3>6>4>2, dans les feuilles de pin 5>3>4>6>2 et dans la propolis 5>4>6>3>2 ; la distribution des différents HAP avec différents numéros d'anneau dans les trois matrices est différente. Les HAP étudiés dans ce travail comprennent les 16 HAP considérés comme les plus dangereux par l'Agence américaine de protection de l'environnement (EPA) :⁵⁹

- acénaphène (3 anneaux),
- acénaphylène (3 anneaux),
- anthracène (3 cycles),
- benzo(a)anthracène (4 anneaux), qui est trouvé jusqu'à 56,62 mg/kg dans la propolis
- benzo(a)pyrène (5 anneaux),
- benzo(b)fluoranthène (5 anneaux),
- benzo(k)fluoranthène (5 anneaux),
- benzo(g,h,i)pérylène (6 anneaux),
- chrysène (4 anneaux),
- dibenzo(a,b)anthracène (5 anneaux),
- fluoranthène (4 anneaux),

- fluorène (3 anneaux),
- indeno(1,2,3-c,d)pyrène (6 anneaux),
- naphthalène (2 anneaux),
- phénanthrène (3 anneaux),
- pyrène (4 anneaux).

L'acénaphtylène, l'acénaphène et le phénanthrène sont caractéristiques du profil d'émission du charbon et de la créosote. L'antracène est caractéristique de la combustion du bois et le chrysène est considéré comme un marqueur du carburant diesel. Le fluorène, le phénanthrène, le fluoranthène et le pyrène permettent de distinguer la pollution provenant des transports routiers de celle provenant des incinérateurs.

Dans ce travail, l'analyse du profil des différents HAP permet de déterminer si les échantillons proviennent d'une zone où la contamination dominante provient de la combustion du charbon, du bois plutôt que des dérivés du pétrole comme le diesel. Ainsi, à partir du profil des HAP mesuré dans les colonies, il est possible de savoir quelles sont les formes de combustion dominantes. La concentration de HAP dans la propolis peut être corrélée avec celle dans le sol (sol, plante, propolis). De manière surprenante, nous lisons dans cet ouvrage que les HAP sont présents dans la propolis parce que les abeilles, au lieu de collecter la résine des plantes (comme les conifères), collectent les hydrocarbures et les substances gommeuses de l'asphalte et du goudron. En l'absence de résines végétales telles que celles produites par les aiguilles de pin, les abeilles ont appris à utiliser l'asphalte et le goudron, qui contiennent divers HAP. À ce stade, il est utile de réfléchir à l'attribution de propriétés antibactériennes, antivirales et antifongiques à la propolis, qui est également utilisée dans les produits pharmaceutiques.

En conclusion, les auteurs soulignent qu'en étudiant le profil des HAP dans les abeilles vivantes et la propolis, il est possible de prédire les principales sources de ces composés dans une zone donnée. En utilisant plusieurs ruches et en examinant le profil de concentration, il pourrait être possible de localiser les sites des sources les plus importantes.

- Des travaux menés en France en 2008 et 2009 ont permis d'étudier la présence de HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques) dans six ruchers. ⁶⁰ Les HAP entrent dans la chaîne alimentaire et constituent un danger car ils sont cancérigènes (par exemple, le benzo(a)pyrène). Comme nous l'avons déjà écrit, en Europe, au moins 15 molécules appartenant aux HAP sont considérées comme les plus importantes (prioritaires selon le Règlement CE n° 108/2005) car elles sont cancérigènes et génotoxiques.

Dans cette recherche effectuée en France, les quatre molécules suivantes ont été recherchées : le benzo[a]pyrène, le benzo[a]anthracène, le benzo[b]fluoranthène et le chrysène, qui sont considérés par l'Autorité européenne de sécurité des aliments (EFSA) comme des marqueurs de HAP cancérigènes dans la chaîne alimentaire. Ces substances ont été recherchées dans des échantillons de miel, de pollen et d'abeilles, collectés auprès d'apiculteurs ayant volontairement participé à la biosurveillance. Six ruchers ont été utilisés et des échantillons de pollen fraîchement prélevé sur les abeilles ont été analysés (le pollen est prélevé à l'aide de pièges spéciaux placés trois jours avant l'échantillonnage) ; des échantillons d'abeilles vivantes et de miel ont également été prélevés dans 8 ruches par rucher. Quatre échantillons ont été prélevés par an pendant deux ans (avril-octobre). Au total, 144 échantillons d'abeilles (de 10 g chacun), 144 échantillons de miel (de 1 g chacun) et 144 échantillons de pollen (de 1 g chacun) ont été prélevés : 432 échantillons au total (ils ont été analysés par chromatographe en phase gazeuse et spectromètre de masse à triple quadripôle).

Les échantillons de miel présentent la plus faible contamination (minimum = 0,03 µg/kg ; maximum = 5,80 µg/kg ; moyenne = 0,82 µg/kg). Les échantillons d'abeilles présentent une concentration plus élevée que le miel (minimum = 0,32 µg/kg ; maximum = 73,83 µg/kg ; moyenne = 7,03 µg/kg). Les échantillons de pollen ont montré les concentrations les plus

élevées : (minimum = 0,33 µg/kg ; maximum = 129,41 µg/kg ; moyenne = 7,10 µg/kg). Le pollen était la matrice présentant les concentrations les plus élevées, suivi par les abeilles et ensuite le miel.⁶⁰

Les plantes sont affectées par la contamination des HAP dans le sol et par les dépôts atmosphériques (autoroutes, aéroports, zones industrielles). Certains types de pollen peuvent contenir jusqu'à 25,4% de lipides (par exemple, la plante *Brassica napus*), de sorte que les HAP peuvent s'y accumuler facilement car ils sont lipophiles. Les abeilles peuvent recueillir des HAP par contact avec la poussière en suspension dans l'air (sur les poils du corps) et le pollen. Ces auteurs soulignent également que les abeilles peuvent collecter du goudron routier au lieu de la résine végétale pour fabriquer la propolis. Les abeilles pourraient être utilisées pour détecter les pics de concentration des HAP dans l'atmosphère et mesurer les différences entre différents sites. Le miel est dérivé du nectar, qui est une substance sucrée et qui a donc peu d'affinité avec les HAP et ne les bioaccumule pas non plus. Dans ce travail, il n'y a aucune preuve du transfert des HAP du pollen ou des abeilles au miel. Les HAP peuvent également contaminer la ruche en raison de la fumée utilisée par les apiculteurs lors de la manipulation de la ruche. Cette contamination volontaire pourrait être responsable de la contamination trouvée dans le miel (entre 0,03 µg/kg et 5,80 µg/kg).

- Une étude menée en Italie a examiné la concentration de HAP dans des abeilles vivantes et dans du miel prélevé sur des colonies élevées dans une zone urbaine et dans une réserve naturelle.⁶⁶ Les échantillons ont été collectés entre mai et octobre 2007 dans deux zones différentes à Lazio (zones urbaines) et Abruzzo (réserve naturelle). Quatre sites étaient situés dans une réserve naturelle, un près de l'aéroport de Ciampino à Rome et un autre près de routes et d'un incinérateur. Chaque station de surveillance était composée de trois colonies de 10 peignes. Les abeilles (échantillons de 2 g) ont été débarrassées du pollen avant d'être utilisées, la ruche ne contenait pas de métaux et la fumigation n'a pas été utilisée (par les apiculteurs lors des inspections). Le miel a été séparé de la cire et des échantillons de 5 g ont été prélevés. L'instrumentation analytique de la chromatographie liquide à haute pression (HPLC avec détecteur de fluorescence) a été utilisée. Toutes les déterminations ont été répétées au moins trois fois et tous les échantillons contenaient des HAP. Le benzo(a)pyrène n'a jamais été détecté, alors que le fluorène, le phénanthrène, l'anthracène, le fluoranthène, le benz(a)anthracène, le benzo(b)fluoranthène et le benzo(k)fluoranthène ont été enregistrés chez les abeilles ; le miel contenait du phénanthrène, de l'anthracène et du chrysène.⁶⁶ Le phénanthrène est la molécule dont la concentration moyenne est la plus élevée, tant dans le miel que dans les abeilles, et a été retrouvé dans 87% des échantillons d'abeilles et 49% des échantillons de miel. Le miel est moins contaminé que les abeilles. Chez les abeilles, la concentration maximale de HAP est de 10 ng/g de poids frais, alors qu'elle est de 3 ng/g de poids frais dans le miel. Les HAP les plus fréquemment présents étaient ceux à 3 cycles (93%), suivis de ceux à 4 cycles (6%) puis de ceux à 5 cycles (1%). Les auteurs concluent que le miel n'est pas un bon bioindicateur de la contamination par les HAP. Le miel contient environ 18% d'eau et est riche en sucres. Les substances hydrophobes telles que les HAP ne se dissolvent donc pas dans une matrice aussi polaire. Les concentrations les plus élevées, relevées dans des échantillons prélevés au mois de mai, ont probablement été générées par l'utilisation de la fumigation, utilisée par les apiculteurs pour étourdir les abeilles lors des inspections. Aucune différence statistiquement significative n'a été constatée entre les HAP détectés dans les zones urbaines et ceux détectés dans les réserves naturelles.

LES MICRO-ORGANISMES DANS LE MIEL

On trouve une grande variété de micro-organismes dans le tube digestif des abeilles : 1% de levures, 27% de bactéries Gram positives (*Bacillus*, *Bacteridium*, *Streptococcus* et *Clostridium* spp.) et 70% de bactéries Gram négatives (*Achromobacter*, *Citrobacter*, *Enterobacter*, *Erwinia*, *Escherichia coli*, *Flavobacterium*, *Klebsiella*, *Proteus* et *Pseudomonas*).⁴¹ La plupart des micro-organismes intestinaux ne se trouvent pas dans le miel, qui est produit et transporté dans le tube digestif, et qui est échangé entre différentes abeilles (pendant la trophallaxie, il est régurgité et livré aux sœurs plusieurs fois). Certains micro-organismes sporulés peuvent survivre dans le miel, tels que : *Bacillus cereus*, *Clostridium perfringens* et *Clostridium botulinum*. *Clostridium botulinum* peut être très dangereux et certains contrôles l'ont trouvé dans le miel : en Argentine (2/177 échantillons positifs), au Brésil (6/85), en Californie (9/90) ; dans ce dernier cas, six des neuf échantillons positifs ont été donnés à des nourrissons qui ont développé le botulisme infantile. Sept cas de botulisme infantile ont été enregistrés en France, entre 1991 et 2009, dus au miel, et au moins un cas a également été enregistré en Italie. Au Japon, 3 des 56 échantillons de sucre vendus pour l'apiculture contenaient des spores de *Clostridium botulinum*. Jusqu'à 25% des échantillons de miel produits aux États-Unis contiennent des spores de *Clostridium botulinum*.⁴¹ Les spores de ces micro-organismes dans le miel peuvent être inactivées par les rayons gamma. Les auteurs de cette étude scientifique concluent que le miel qui n'a pas été testé ou aseptisé ne doit pas être donné aux nourrissons (ceux de moins d'un an).

Le champignon *Aspergillus* peut se développer sur le pollen stocké dans la ruche et produire des ochratoxines et des aflatoxines.¹⁰⁷ L'abeille domestique semble être adaptée à la présence de mycotoxines car elle possède des enzymes (*cytochrome P450*) capables de les détoxifier (par exemple l'aflatoxine B1 et l'ochratoxine). Le champignon *Aspergillus flavus* peut provoquer une maladie des abeilles (dommages au couvain). Il s'agit probablement d'un micro-organisme qui pourrait être transmis de l'abeille à l'homme et générer une maladie très rare (il affecte les poumons).²³⁰

LES ANTIBIOTIQUES DANS LE MIEL

Il est bien connu qu'une bonne alimentation en pollen, dans des conditions naturelles, est suffisante pour garantir la capacité de la colonie à lutter contre les maladies bactériennes.²⁴³ La pratique vétérinaire imposée aux apiculteurs pour limiter la propagation des maladies bactériennes est la destruction des colonies infectées. Dans l'État de Pennsylvanie (États-Unis), plus de 32.000 colonies ont été brûlées entre 1930 et 1965.⁴⁸⁴ Les abeilles sont capables de faire des choix alimentaires ; par exemple, les larves des colonies affectées par le champignon parasite *Nosema*, si elles ont le choix, préfèrent le miel ayant une plus grande activité antimicrobienne.⁷¹⁸

Au fil du temps, différentes molécules antimicrobiennes telles que les oxytétracyclines, la tylosine et le sulfathiazole ont été utilisées dans différentes parties du monde contre les bactéries de la peste, tandis que la fumagilline isolée de l'*Aspergillus fumigatus a* été utilisée pour combattre *Nosema apis*.

En Europe, l'utilisation des antibiotiques est interdite, alors qu'ils peuvent être utilisés par les apiculteurs aux États-Unis, par exemple, pour traiter la loque américaine.⁷⁷ L'utilisation d'antibiotiques en apiculture est également interdite en Italie, et il est important de rappeler que les abeilles sont capables de produire des protéines ayant un effet antibiotique (par exemple l'*apidaecin*). Mais malheureusement, même là où l'utilisation d'antibiotiques est interdite, ils sont détectés par certains contrôles (par exemple en Italie).³⁵ Ainsi, les antibiotiques sont interdits et, en général, peu d'informations existent sur la biorsurveillance de l'utilisation illégale

par les apiculteurs. En effet, les antibiotiques sont la seule arme dont disposent les apiculteurs pour lutter contre certaines maladies microbiennes, en plus de l'alternative que constitue la destruction des colonies infectées.¹⁷ Les antibiotiques peuvent être efficaces contre certaines bactéries comme les agents de la loque américaine et européenne (*Paenibacillus larvae* et *Melissococcus plutonius* ; ces bactéries sont excrétées dans les fèces des abeilles).¹⁰⁷ Les antibiotiques n'agissent pas sur les spores.

Les principes actifs utilisés pour combattre ces bactéries sont les sulfonamides, le sulfatiazole (utilisé illégalement en Italie et qui a déjà entraîné l'apparition de bactéries résistantes à la peste européenne), la tétracycline, l'oxytétracycline, la streptomycine, les sulfonamides, l'érythromycine, la lincomycine, la monensine, l'enrofloxacin, la tylosine et le chloramphénicol.^{35, 41} Dans le miel, l'oxytétracycline, le chloramphénicol et l'érythromycine ont été mesurés à des concentrations dangereuses (entre 50 et 1.776 ng/kg d'érythromycine). On peut également trouver des antibiotiques dans le miel 290 jours après leur administration (par exemple la lincomycine).⁴¹

Plusieurs variétés de bactéries agents de la loque américaine (*Paenibacillus larvae*) ont été signalées depuis longtemps comme ayant acquis la capacité de résister à certains antibiotiques tels que, par ordre décroissant de sensibilité, les tétracyclines, les oxytétracyclines (la seule autorisée aux USA pour l'usage en apiculture), la tylosine et la lincomycine.^{484, 744} La découverte de variétés pathogènes résistantes aux médicaments renforce la suspicion d'utilisation d'antibiotiques par les apiculteurs, car la présence de caractéristiques de résistance génétique est sélectionnée par l'utilisation de ces molécules. La différence de sensibilité aux antibiotiques de différentes variétés de loque américaine peut être utilisée pour étudier les caractéristiques des populations bactériennes chez les abeilles.

Une enquête menée en Chine enregistre les molécules suivantes dans le miel : tétracycline, oxytétracycline, doxycycline, chlortétracycline et chloramphénicol.⁴¹

Le contrôle d'échantillons de miel importés d'Inde en Europe ou aux États-Unis en 2006 a révélé que 14% des échantillons étaient contaminés par des tétracyclines ; en 2007-2008, 28% des échantillons de miel étaient contaminés par des antibiotiques à des concentrations dangereuses ; en 2009-2010, 29,2% (sur 362 échantillons).⁴¹

En Europe, la présence d'antibiotiques dans le miel est interdite et il n'existe pas de concentrations maximales autorisées, sauf dans quelques pays qui les ont fixées entre 0,01 et 0,05 mg/kg (par exemple, la Belgique, le Royaume-Uni et la Suisse). Plusieurs exercices de surveillance confirment l'utilisation d'antibiotiques par les apiculteurs :⁴¹

- Une enquête menée en Suisse a trouvé du chloramphénicol dans 17% des échantillons de miel (13/75).
- Des recherches menées en Grèce ont révélé que 29% de 251 échantillons de miel contenaient des tétracyclines.
- En Allemagne, 21% des 183 échantillons de miel étaient contaminés par la streptomycine.
- En Europe, 3.855 échantillons de miel ont enregistré 1,7% de non-conformité pour les antibiotiques suivants : streptomycine, sulfamides, tétracycline, chloramphénicol, nitrofuranes, tylosine et quinolones.

En Italie, des enquêtes menées entre 2002 et 2007 ont permis d'enregistrer la présence d'antibiotiques dans 2,7 à 7% des échantillons de miel analysés (par exemple, tétracyclines et oxytétracyclines, sulfamides et tylosine).³⁵ La tylosine peut se retrouver dans le miel jusqu'à huit mois après sa distribution dans la colonie.

Il est intéressant de remarquer que l'herbicide asulam [*Methyl N-(4-aminophenylsulfonyl)carbamate*] se transforme en un antibiotique, le sulfanilamide, que l'on trouve dans le miel.^{41, 79}

Il est important de voir que les bactéries devenues résistantes peuvent distribuer les facteurs génétiques qui confèrent cette capacité dangereuse à des bactéries d'espèces différentes, ce qui amplifie les effets négatifs et les coûts associés.

On trouve dans l'intestin des abeilles un micro-organisme (un actinomycète du genre *Nocardiosis*) qui produit des molécules (*phénazines*) qui agissent comme antibiotiques contre certaines bactéries (*Bacillus* spp). Certaines bactéries symbiotes des abeilles, parmi celles que l'on trouve dans l'intestin, sont capables d'inhiber la croissance du champignon responsable du couvain calcifié (*Ascosphaera apis*) et celle de la bactérie génératrice de la loque américaine (*Paenibacillus larvae*).³⁵ L'utilisation de molécules ayant des propriétés antibiotiques, en plus de générer le phénomène bien connu de la sélection de micro-organismes résistants, modifie l'équilibre existant dans le microbiome (dans ce cas, nous faisons référence à l'ensemble des micro-organismes présents dans les abeilles). Ainsi, l'utilisation d'antibiotiques peut favoriser les bactéries pathogènes car elle nuit à leurs concurrents naturels, dont les relations avec l'hôte (les abeilles) et les micro-organismes pathogènes ont évolué et ont été régulées sur une très longue période ; ces relations sont largement inconnues.

Il est également intéressant de décrire une autre molécule inhibitrice qui n'est pas un antibiotique car elle est dirigée contre les champignons : la *fumagilline*, qui a été extraite de certains champignons (*Aspergillus fumigatus*) et qui est utilisée par les apiculteurs pour lutter contre les champignons unicellulaires qui sont des parasites intestinaux des abeilles (*Nosema ceranae* et *Nosema apis*). Ces champignons pathogènes se propagent dans l'environnement via les excréments des abeilles. L'ingestion d'une spore par les abeilles entraîne la production de 30 à 50 millions de spores dans le tube digestif en deux semaines environ (la DL₅₀ de *Nosema apis* est d'environ 20 à 50 spores).³⁵ Ainsi, l'ingestion de quelques spores suffit à provoquer la mort d'une abeille et à contaminer toute la colonie. La spore ingérée peut germer en 30 minutes dans l'estomac et une abeille peut contenir plus de 200 millions de spores.⁶⁰¹ Ce champignon peut également être propagé par les fourmis, les teignes et le guêpier (un oiseau insectivore qui aime manger des abeilles).

Les antibiotiques se retrouvent dans les produits de l'abeille même lorsqu'ils ne sont pas administrés par les apiculteurs, en raison de la contamination de l'environnement par les effluents d'élevage. Les abeilles peuvent s'approvisionner en eau à partir d'excréments d'animaux, qui peuvent être contaminés par des antibiotiques. Les chercheurs ont constaté que les abeilles, même en présence de sources d'eau propre, préfèrent les effluents d'élevage.¹³ Ainsi, les antibiotiques entrent dans la ruche et peuvent contaminer les produits apicoles lorsqu'ils ne sont pas utilisés par les apiculteurs. Certains pesticides utilisés dans l'élevage pour combattre des maladies comme les parasites peuvent également se retrouver dans le fumier utilisé par les abeilles. Dans une région française (en 2009), une augmentation de la mortalité des abeilles a été associée à des traitements contre les tiques et les vers intestinaux chez les moutons.²³⁰

L'utilisation d'insecticides (par exemple des pyréthroïdes comme la perméthrine) pour désinfecter les élevages a entraîné la mort d'abeilles (en 2009 et 2014 en France). Certains pesticides sont également enregistrés depuis longtemps comme antibiotiques (par exemple le glyphosate, qui est utilisé comme herbicide).⁵⁰⁰ L'exposition à certains pesticides à action antibiotique peut donc favoriser l'émergence de variétés résistantes et modifier l'équilibre entre les micro-organismes symbiotiques normalement présents dans l'organisme des abeilles.

Il existe également un autre mécanisme négatif possible qui devrait nous inciter à ne pas utiliser les antibiotiques : la synergie entre ceux-ci et certains pesticides. Par exemple, une certaine synergie entre les acaricides utilisés par les apiculteurs (par exemple le coumaphos et le fluvalinate) et certains antibiotiques (par exemple l'oxytétracycline) est connue pour sa capacité d'augmenter la mortalité des abeilles (entre 7% et 51% dans le cas d'une exposition simultanée

au coumaphos et à l'oxytétracycline ; entre 5,6% et 39% dans le cas d'une exposition simultanée au fluvalinate et à l'oxytétracycline).⁶⁰¹

L'utilisation abusive d'antibiotiques dans les secteurs de l'élevage, de la santé et de l'alimentation engendre d'énormes coûts sociaux, tels que le développement de micro-organismes résistants aux antibiotiques et l'incidence accrue de certaines maladies comme l'obésité (due à une modification de la composition microbienne du tube digestif).^{752, 756, 757}

SURVEILLANCE DES MALADIES DES VÉGÉTAUX PAR LES ABEILLES

Puisque les abeilles d'une colonie se déplacent sur le territoire et collectent chaque jour de l'eau, du pollen, du nectar, du miellat et des résines à des milliers d'endroits différents, elles sont en mesure de transporter et de propager des phytopathogènes. En supposant qu'un rucher est composé de 10 ruches placées sur un même site, qu'au moins 10.000 abeilles volent chaque jour dans une ruche à la recherche de nectar et de pollen, et que chacune visite au moins 800 fleurs (ce qui fait 10 vols par jour), il est facile d'imaginer la possibilité de répartir les parasites des plantes entre les différentes plantes comme certaines bactéries : théoriquement, un rucher de 10 colonies peut visiter plus de 80.000.000 de fleurs par jour. À cet égard, il est utile de donner l'exemple d'une bactérie (*Erwinia amylovora*) qui peut endommager plus de 200 cultures (par exemple, les pommes et les poires) et qui est certainement transportée par les abeilles. Cette maladie est très grave car il est presque impossible d'arrêter sa propagation et elle peut être distribuée par de nombreux vecteurs, à tel point que les agriculteurs ont été contraints d'abandonner les cultures touchées à plusieurs reprises. Le caractère nomade de l'apiculture favorise probablement la propagation de ces agents pathogènes.

Erwinia amylovora est une bactérie (gram-négatif de la famille des Enterobacteriaceae), l'agent de la maladie végétale connue sous le nom de *feu bactérien*. Cette maladie affecte plus de 200 espèces appartenant à 40 genres de la famille des Rosaceae, parmi lesquelles beaucoup sont d'une grande importance pour l'économie humaine (pommier, poirier, néflier du Japon, coing, sorbier) et certaines espèces ornementales (aubépine) ou d'autres espèces comme l'acacia.^{17, 18} En Italie, les premiers foyers ont été détectés en 1990 dans des champs de poires en Apulia et plus tard en 1994 en Emilia Romagna.^{17, 34} Dans l'Union européenne, en raison de la nécessité de lutter contre sa propagation, la bactérie a été inscrite sur la liste européenne des agents pathogènes de quarantaine (directive 2000/29/CE) et, en Italie, elle est soumise à des mesures de contrôle obligatoires (décret ministériel n° 356 du 10 septembre 1999). Cette maladie est une maladie bactérienne qui peut se propager par l'intermédiaire d'insectes vecteurs. Les fleurs sont les premiers organes à être touchés. Les premiers symptômes apparaissent sur les réceptacles, sous forme de taches qui noircissent et se déplacent vers les pédoncules. Les fleurs touchées se dessèchent mais restent souvent attachées à la branche qui les a générées, ce qui en fait une source dangereuse d'inoculum pour les infections secondaires. Les infections primaires se produisent sur les fleurs, qui se fanent et exsudent des exsudats qui sont une source d'inoculum pour les infections secondaires. La floraison échelonnée des différentes espèces hôtes permet de prolonger la période d'émergence des infections primaires, ce qui contribue à la propagation de la maladie. Après avoir infecté les différents organes floraux, la bactérie traverse les espaces intercellulaires du pédoncule floral et atteint la base de l'inflorescence et le rameau. Poursuivant sa croissance dans les couches corticales, la bactérie atteint d'autres pousses et la tige, où elle donne naissance à de nouveaux cancers. Les fruits sont sensibles aux stades de la maturation, de la nouaison à la véraison. La bactérie affecte également d'autres tissus végétaux tels que les feuilles et les pousses. *Erwinia amylovora* passe l'hiver sur les bords des chancres cuivrés formés au cours de la saison précédente.

Les pousses peuvent être infectées par des insectes vecteurs et par la pluie, qui diluent et distribuent les exsudats sur les nouvelles pousses, dans lesquelles les bactéries pénètrent par des blessures et des lésions. La bactérie peut également se propager directement à partir des chancres où les cellules bactériennes se déplacent à l'intérieur de la plante via le xylème et atteignent les pousses voisines.

Plus de 70 genres d'insectes ont été décrits comme vecteurs d'*Erwinia amylovora*, dont les plus importants sont les abeilles et les guêpes. Ils visitent les organes floraux et sont attirés par les substances sucrées telles que les exsudats bactériens. La maladie se propage alors rapidement dans le verger même. La bactérie peut rester viable pendant au moins 48 heures sur le corps de l'insecte ou dans le tractus intestinal. En revanche, si la bactérie est incorporée dans le nectar, le pollen ou le miel, elle peut rester active pendant des semaines, ce qui explique pourquoi les ruches peuvent être de dangereuses sources d'inoculum. Cependant, le potentiel infectieux se réduit considérablement avec le temps, et les essaims contaminés ne seront probablement plus en mesure d'infecter de nouvelles plantes au cours de la saison de croissance suivante. En analysant le pollen contenu dans les rayons ou le miel des colonies infectées, on peut suivre les espèces visitées par les abeilles. En effectuant un suivi continu (par exemple hebdomadaire ou bihebdomadaire), il est possible de savoir grâce aux abeilles si la bactérie est présente et grâce à l'analyse du pollen dans quelle espèce (on peut utiliser des pièges qui capturent le pollen des abeilles lorsqu'elles arrivent chargées à la ruche ; ils sont installés à l'entrée pendant quelques heures ; la colonie d'abeilles dans laquelle le système mécanique de collecte du pollen est installé répond à cette réduction de la disponibilité des protéines en augmentant le nombre de butineuses qui collectent le pollen, de sorte qu'il ne peut pas être utilisé longtemps).³¹ La biosurveillance permet probablement de savoir si la bactérie est présente avant que des symptômes évidents n'apparaissent dans les vergers.^{17, 34} Les colonies d'abeilles peuvent être utilisées pour surveiller dans quelle direction et à quelle vitesse les phytopathogènes se déplacent d'une zone infectée à une autre. Inversement, les insectes tels que les abeilles peuvent être des vecteurs, se déplaçant des zones contaminées vers les zones non contaminées.

Pour surveiller la présence de ce parasite, on peut placer des groupes de 2 ou 3 ruches à proximité de cultures qui ne présentent aucun signe de maladie. Il existe des systèmes d'analyse rapide (immuno-enzymatique) pour la détermination du micro-organisme.³⁴ Les micro-organismes phytopathogènes tels que *Erwinia amylovora* ou le feu bactérien peuvent être recherchés dans le pollen et le miel. Dans ce cas, il peut être utile d'effectuer également une analyse du pollen pour identifier les espèces qui ont été visitées par les abeilles, c'est-à-dire celles qui sont le plus susceptibles d'avoir le phytopathogène.

Les insectes peuvent favoriser la transmission de champignons phytopathogènes, qui peuvent également être dangereux pour l'homme et le bétail. L'ergotisme est une maladie qui peut se manifester chez l'homme par des symptômes graves tels que l'insomnie, des douleurs intestinales, des douleurs articulaires et des convulsions. Cette maladie est causée par une intoxication à l'*ergot*, un champignon (*Claviceps purpurea*) qui infecte les graines d'herbes et de graminées sauvages, en particulier le seigle (*Secale cereale*). Entre 591 et 1789, au moins cent trente-deux épidémies d'ergotisme ont été enregistrées en Europe.⁷⁰⁴ Le champignon disperse ses spores dans le vent et infecte les fleurs. La fleur infectée est remplie de miellat prélevé dans la sève de l'hôte et additionné de spores d'*ergot*. Les insectes à la recherche de nectar contribuent à transmettre le champignon à d'autres fleurs. L'*ergot* contient des molécules toxiques qui affectent le système nerveux, comme l'acide lysergique, à partir duquel est fabriqué le célèbre médicament LSD. Ainsi, ce champignon peut être propagé du sol et des plantes sauvages aux plantes cultivées par le vent et les insectes.

En conclusion, le nomadisme des abeilles peut favoriser la propagation de maladies aux insectes mais aussi aux plantes et aux autres animaux, et c'est pour ces raisons aussi qu'il doit être limité.

RÉFLEXIONS SUR LA BIOSURVEILLANCE

EXPOSITION AUX PESTICIDES : LE VISAGE MORTEL DU PROGRÈS

Les pesticides sont utilisés en grandes quantités et se retrouvent donc dans les insectes, le corps humain, les fleurs, le sol, l'eau et les aliments. L'ensemble des résultats de surveillance examinés dans les chapitres précédents confirme une forte contamination des colonies d'abeilles d'élevage. Cette section se concentre sur les produits apicoles, mais la contamination affecte l'ensemble de la biosphère, y compris les humains.

Non seulement les pesticides tuent les insectes sans distinction, y compris les insectes sauvages considérés comme utiles, mais ils tuent aussi les oiseaux, empoisonnent l'eau, tuent les poissons, les amphibiens et provoquent la mort d'organismes utiles au délicat et indispensable écosystème du sol agricole comme les vers ou le microbiome comme l'intestin.⁴¹⁶ Les effets négatifs peuvent également se produire de manière indirecte et discrète ; par exemple, les insecticides organochlorés (par exemple le DDT) favorisent le déclin des oiseaux en raison de leurs effets négatifs sur la fertilité.⁴¹⁸

Les effets enregistrés en liaison avec l'utilisation de certaines molécules (par exemple dans le maïs, le coton, le colza, le tournesol) ont conduit à des décisions non résolutes telles que l'interdiction de substances spécifiques (par exemple trois néonicotinoïdes et le fipronil) sur certaines cultures et dans certains pays. En Italie, grâce à certaines suspensions, les réseaux de surveillance ont observé une réduction de la mortalité des abeilles de 19% à 10% entre 2010 et 2013.¹⁹⁶ Ces actions sont des signaux positifs faibles, mais non concluants, qui laissent espérer une augmentation de la sensibilité. Les molécules incriminées, comme les insecticides néonicotinoïdes, figurent encore parmi les molécules les plus utilisées dans le monde. Une étude portant sur 198 échantillons de miel du monde entier (publiée en 2017) a révélé que 75% étaient contaminés par au moins une des cinq molécules néonicotinoïdes, 45% par deux, et environ 10% par quatre à cinq.¹⁹⁶ Les concentrations détectées sont très souvent faibles, à tel point qu'il n'est pas facile de les déterminer de manière instrumentale, mais la toxicité de ces molécules est très élevée : un gramme de néonicotinoïdes est aussi toxique pour les abeilles que plus de 7 kilos de l'insecticide DDT. Un autre signe qui laisse espérer des jours meilleurs est l'attribution, par la justice italienne, du crime de catastrophe environnementale pour l'utilisation des néonicotinoïdes (2018).

Comme nous l'avons vu, les abeilles (*Apis mellifera*) sont utilisées pour étudier les effets des pesticides sur les insectes, mais elles ne constituent pas le meilleur avertissement ou point de référence pour un certain nombre de raisons :

- Elles sont maintenues dans des nids artificiels et ne doivent plus construire leurs propres rayons de miel, l'apiculteur épargnant aux abeilles un travail considérable en recyclant la cire. Elles n'ont donc plus besoin de construire leurs propres nids.
- Elles sont nourries avec des aliments et sont donc plus résistantes aux facteurs environnementaux tels que le manque de nutrition. Au final, elles n'ont plus besoin de fleurs.
- Lorsque les choses vont mal (par exemple, le froid, le manque de fleurs, les traitements aux pesticides), l'apiculteur déplace les abeilles, même sur des milliers de kilomètres. Cette symbiose récente a fourni aux abeilles le service de transport sur roues.

- Si la reine des abeilles a des problèmes ou meurt, on la remplace en l'achetant dans des centres qui peuvent pratiquer l'insémination artificielle (il existe un commerce de liquide séminal).⁶⁷⁰ Les reines d'abeilles peuvent donc voyager en avion à travers les continents très rapidement.
- L'apiculteur utilise des produits chimiques pour traiter les maladies des abeilles.
- L'apiculteur procède à diverses pratiques telles que l'inspection des ruches, qui est généralement précédée d'un enfumage (utilisation de la fumée), dans le but de les apprivoiser (la fumée peut déclencher une alarme incendie : les abeilles pourraient se préparer à une fuite d'urgence). Une autre pratique curieuse consiste à ouvrir la colonie et à saupoudrer les abeilles de sucre glace. Les apiculteurs ont appris à saupoudrer le corps des abeilles avec des poudres telles que le sucre glace, qui induit un comportement de nettoyage réciproque plus intense, afin d'inciter le *varroa* à partir.

Pour ces raisons, la surveillance de l'état de santé des abeilles ne fournit pas d'informations fiables sur d'autres animaux tels que les pollinisateurs sauvages. La surveillance, avec les abeilles, des effets des graines de colza enrobées de néonicotinoïdes et de pyréthroïdes (clothianidine et bêta-cyfluthrine), n'est pas suffisante pour évaluer les dommages causés aux pollinisateurs sauvages.⁵⁹⁶ Ces recherches montrent que les insecticides causent des dommages importants et inquiétants aux bourdons, aux abeilles solitaires et à d'autres insectes. L'utilisation des abeilles domestiques pour l'information sur les risques sous-estime les effets tels que la réduction de la biodiversité des pollinisateurs sauvages. En général, les insectes sauvages peuvent être plus sensibles aux effets négatifs des pesticides (par exemple, les insectes qui pondent leurs œufs sur les feuilles ou ceux qui ne bénéficient pas de la protection de la colonie, comme la reine des abeilles, sont appelés abeilles solitaires).⁵⁹⁶

Certains polluants sont connus pour altérer la fertilité et la reproduction chez les animaux tels que les insectes, les humains ou les poissons, mais les effets sur les gamètes des plantes sont moins bien connus. La mesure de la viabilité du pollen suite à une exposition à des polluants est un aspect qui pourrait être approfondi : par exemple, le pollen de *Pinus nigra* est altéré et sa viabilité est réduite lorsque la concentration de dioxyde d'azote dans l'atmosphère (NO₂ produit par la combustion) augmente.⁸⁷⁰

Les résultats présentés par plusieurs études mettent en évidence plusieurs problèmes critiques. Les méthodologies utilisées pour établir la toxicité des pesticides pour les pollinisateurs et les espèces non ciblées avant leur commercialisation ne sont pas suffisantes pour établir le danger réel. Nos connaissances montrent qu'il existe des effets sublétaux qui se produisent à des doses plus faibles que celles utilisées dans les tests de toxicité aiguë et qui sont tout aussi mortels. Au lieu de se manifester chez des individus en moins de 72 heures, elles surviennent après quelques jours ou semaines et affectent toute la colonie (dans le cas des abeilles). De très faibles doses de certains pesticides, de leurs métabolites ou d'autres molécules présentes dans les formulations commerciales affectent le comportement, la reproduction, la mémoire, l'orientation, la capacité à communiquer par la danse, la capacité à chercher de la nourriture et à retourner à la ruche.¹²²⁷ Il existe également un autre problème majeur, celui des effets synergiques et additifs. Les doses qui ne montrent pas d'effets négatifs en laboratoire dans des conditions réelles sont tout aussi mortelles, mais à des échelles de temps légèrement plus longues. Ces connaissances scientifiques devraient être utilisées pour réviser la procédure utilisée pour établir la dangerosité des molécules (on utilise des doses capables de tuer plus de 50% des insectes exposés en quelques heures par contact ou par ingestion).¹²²⁷ En outre, les résultats obtenus sur les abeilles domestiques ne peuvent être transférés à d'autres insectes. L'évaluation actuelle des risques ne permet pas de fournir des garanties tant pour les abeilles que pour les espèces non ciblées telles que les autres pollinisateurs ou les oiseaux. Cependant, il

existe un ensemble considérable de travaux scientifiques qui devraient nous conduire à des mesures préventives et à une précaution accrue.

QUELQUES CONSIDÉRATIONS PERSONNELLES

Il faut souligner que dans certaines des publications examinées, les auteurs, après avoir présenté un tableau très alarmant (comme la présence de plusieurs pesticides dans un même échantillon de pollen ou de cire, et à des concentrations dangereuses), ont tendance dans leurs conclusions à minimiser le problème, de manière superficielle et peu convaincante, ou à se tourner vers des hypothèses non prouvées.¹⁸⁸ Il est important de rappeler que 121 molécules de pesticides différentes peuvent être trouvées dans les colonies d'abeilles à des concentrations supérieures à 200 ppm, jusqu'à 39 molécules étant présentes dans la cire et d'autres dans le pollen et les abeilles en même temps.⁵⁹⁷

Les résultats de recherche présentés sur la biosurveillance des pesticides, des métaux et des HAP avec les produits apicoles présentent plusieurs limites, par exemple :

- Elles utilisent des méthodologies d'enquête différentes, il n'est donc pas facile de faire des comparaisons (par exemple, les méthodes d'analyse, les méthodes d'échantillonnage).
- La méthodologie de présentation des résultats d'analyse est souvent différente ou incomplète (par exemple, les concentrations ne tiennent pas compte de la teneur en eau des différentes matrices et, par conséquent, dans certains cas, on ne sait pas si elles se réfèrent au poids sec ou au poids total).
- Des molécules différentes sont recherchées dans des matrices différentes.
- Les sites autour des ruches, à portée des abeilles, sont rarement décrits en détail.
- Dans les études examinées, l'origine botanique du miel n'est souvent pas indiquée. L'absence de ces informations constitue une autre limite majeure.
- Les concentrations trouvées dans les produits apicoles sont rarement comparées à celles trouvées dans d'autres matrices telles que les plantes (par exemple, les fruits et légumes ; les fleurs ; les feuilles), le sol, l'air et l'eau (les informations provenant des stations de surveillance de l'air utilisées par les autorités sanitaires pourraient être utilisées et des ruches pourraient être placées près des stations).
- Il n'y a pas d'information sur les traitements phytosanitaires effectués sur le terrain (ex. : carnets de terrain). Il n'y a aucune information sur la façon dont les molécules toxiques sont utilisées dans les champs, sur les mélanges, le mode de distribution, les quantités utilisées et le moment des traitements. Il n'existe pas non plus d'informations sur les formulations, c'est-à-dire les molécules qui sont distribuées avec les ingrédients actifs des pesticides et qui constituent souvent la majeure partie du poids du produit commercial.
- Peu d'informations sont disponibles sur les métabolites issus des pesticides, qui sont souvent les molécules les plus importantes d'un point de vue toxicologique.
- Aucune information n'est disponible sur l'utilisation de pesticides par les apiculteurs (par exemple, acaricides-insecticides, fongicides, fumigations).
- Aucune information n'est disponible sur la qualité du sol, de l'eau et de l'air, qui influencent également la quantité de fleurs, de pollen et de nectar.
- Il n'y a pas d'informations sur les inventaires d'émissions (par exemple les métaux) et les déchets produits et/ou rejetés sur les sites, tels que ceux classés comme contaminés ou industriels.
- D'autres bio-indicateurs tels que les poissons, les plantes sauvages, les insectes sauvages, les lichens et les oiseaux ne sont pas évalués.

- Dans les échantillons d'abeilles vivantes, il est plus difficile de mesurer les pesticides recherchés pour plusieurs raisons : seule une petite fraction des molécules est absorbée, les abeilles contaminées meurent et ne reviennent pas à la ruche.

Par conséquent, les informations présentées dans les différentes publications consultées présentent de nombreuses limites, mais indiquent néanmoins une situation très dangereuse pour la santé des abeilles et au-delà.

L'estimation des facteurs de bioconcentration des pesticides particulièrement dangereux pour les abeilles pourrait être très intéressante, car peu d'informations sont actuellement disponibles. En analysant les concentrations dans le sol, l'eau, l'air, les plantes à fleurs (par exemple le pollen et les fleurs), les abeilles vivantes, les abeilles mortes, les larves, le miel, la propolis et la cire, il est possible de faire des comparaisons et des évaluations qui sont également utiles pour les apiculteurs. On pourrait faire de même pour des métaux plus dangereux comme le cadmium, le mercure, l'arsenic, le chrome, le plomb et certains hydrocarbures aromatiques polycycliques. Une revue de la littérature scientifique suggère que les abeilles et les produits apicoles ne sont pas la meilleure matrice pour obtenir des informations sur la contamination de l'environnement par les pesticides, les métaux ou les hydrocarbures aromatiques polycycliques. À l'avenir, d'autres comparaisons pourraient être effectuées, comme celles suggérées ci-dessous :

- Pour les métaux et les radionucléides, il pourrait être intéressant de comparer les concentrations dans le sol, les fleurs (qui se bioconcentrent), l'eau et l'air avec celles dans la propolis, le pollen et la cire (provenant de préférence de ruches produisant du miel de miellat).
- Pour les pesticides, il pourrait être intéressant de comparer les concentrations dans les plantes (par exemple, dans les fleurs, les feuilles et d'autres tissus végétaux tels que les fruits et les graines que nous mangeons), le pollen, le sol et l'eau avec celles dans la cire, la propolis et le miel.
- Pour les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), il peut être intéressant de comparer les concentrations dans le sol, l'air, les feuilles (et autres tissus végétaux), le pollen avec celles dans la cire et la propolis (provenant de préférence de ruches produisant du miel de miellat). Le miel est dérivé du nectar, une substance sucrée qui a peu d'affinité avec les HAP et ne les bioaccumule donc pas.⁶⁰
- Pour les polychlorobiphényles (PCB), il pourrait être intéressant de comparer les concentrations dans le sol et les plantes avec celles dans la cire et la propolis.

Un autre aspect à commenter est qu'il existe des différences considérables entre les pays dans la définition des limites des concentrations autorisées de substances dangereuses dans des produits tels que le miel (même plus de 100 fois). Ce facteur rend plus difficile dans certains cas la comparaison des résultats d'études menées dans différents pays. Certaines substances sont autorisées dans certains pays et, au contraire, ne sont pas tolérées dans d'autres et, dans de nombreux cas, il n'existe aucune réglementation (dans ce dernier cas, l'interprétation du principe de précaution devrait suggérer de prescrire l'absence de substances potentiellement dangereuses). Les analyses de risque qui en résultent ne sont donc pas toujours faciles à comparer, car elles partent d'hypothèses sanitaires complètement différentes.¹⁷⁸

Une autre limite est l'hétérogénéité des méthodes d'échantillonnage, d'extraction et d'analyse utilisées. L'absence de normalisation des procédures et des méthodes d'analyse implique une variabilité qui peut ne pas permettre des comparaisons faciles.¹⁷⁹ L'information est recherchée à partir de quelques grammes d'échantillon (par exemple : 2 à 5 g de pollen) qui sont traités avec des solvants pour extraire les molécules recherchées dans des solutions de millièmes de litre. Cette très petite quantité est insérée dans l'instrument qui devra détecter les quantités de centaines de molécules différentes. Comme on peut le constater, la représentation de la gravité de la pollution par la seule détermination analytique est insuffisante et incomplète.

L'ÉDUCATION À L'ENVIRONNEMENT SUR LE TERRAIN

Il pourrait être intéressant de planifier certaines activités liées à l'activité de biosurveillance, dans l'intention d'impliquer la population et de réaliser une éducation environnementale. Les activités qui pourraient compléter et soutenir la biosurveillance sont proposées ci-dessous.

1) *Citizen science* ou science ouverte à tous

L'objectif est de permettre au public de réaliser des activités scientifiques sous la direction de professionnels et en coopération avec des institutions scientifiques. L'implication du public peut apporter un soutien précieux à la protection de l'environnement, notamment par l'amélioration de la culture. De nombreux types de projets peuvent tirer des avantages considérables de la participation du public, en générant des données et des informations scientifiquement intéressantes.¹¹⁸⁷ L'une des applications les plus répandues est la réalisation de recensements d'espèces d'insectes, d'oiseaux ou de plantes. De manière peu coûteuse et généralisée, puisque des volontaires sont impliqués, il est possible de surveiller la présence d'espèces (par exemple, les espèces envahissantes), de collecter des données sur l'état de santé des plantes, d'obtenir des informations sur les migrations ou d'économiser des ressources pour la recherche de fossiles.¹¹⁸⁷ Ce sont des occasions de collaboration et de confrontation positives entre les professionnels et la population qui sont les principaux gardiens et bénéficiaires des ressources environnementales locales. Des synergies positives peuvent naître de cette interaction et influencer les décideurs dans le sens d'un plus grand respect de l'environnement.

Des exemples de projets déjà exploités sont donnés. Les pages Internet pourraient inclure des informations et des photographies des principales espèces à surveiller (par exemple, les fleurs, les insectes et les oiseaux), ainsi que les formulaires à remplir pour signaler leur présence. Avec l'aide de volontaires, il serait possible de réaliser un recensement, avec photos, des pollinisateurs et des fleurs présents dans une zone donnée (abeilles, guêpes, bourdons et papillons) en utilisant des ressources en ligne (atlas, formulaires d'inscription, etc.).² La surveillance des fleurs dans les arbres ou les prairies pourrait être encouragée à des moments synchronisés (pendant quelques minutes, aux heures et dans les conditions où il est le plus facile d'observer les abeilles en vol).

Pour surveiller la présence d'abeilles et d'autres insectes pollinisateurs, on peut installer des mangeoires contenant une solution d'une part de miel, de trois parts de sucre et de trois parts d'eau.⁷⁶⁴ On peut s'en servir pour attirer les abeilles et autres insectes. En utilisant deux mangeoires distantes, il est possible, par triangulation, c'est-à-dire en mesurant les angles de vol dominants, de déterminer dans quelle direction se trouve le nid. En outre, s'il était possible de marquer les abeilles individuelles en calculant leur temps de vol, il serait possible d'avoir une indication de la distance. En photographiant les insectes présents dans les mangeoires-appât, positionnées à différents endroits, il est possible d'avoir une mesure de la densité des insectes pollinisateurs tels que les abeilles solitaires et d'autres insectes sauvages (par exemple les papillons). Les photographies pourraient être prises à des moments fixes et selon des modalités fixes (par exemple, pendant les heures les plus chaudes du printemps, en l'absence de vent et de pluie). Ce recensement pourrait facilement être effectué par des étudiants et des bénévoles, et des photos avec les positions géographiques, la description de la zone et d'autres informations pourraient être collectées et archivées par les chercheurs.

2) Déclin des abeilles et perte de la biodiversité florale

Environ 70 des plus de 100 espèces végétales majeures que nous mangeons sont pollinisées par les abeilles (par exemple, les pommes, les amandes, les poires, les fraises, les carottes, les brocolis, les olives, les oignons, les cacahuètes, les avocats).^{2, 17, 45} Depuis plusieurs années, on assiste à la disparition des ruches sur l'ensemble de la planète en raison de divers facteurs tels que l'utilisation de pesticides dans l'agriculture et la réduction de la biodiversité, ce qui entraîne la monotonie et le manque de nourriture. De manière optimiste, il est possible de souligner que sans les abeilles, le prix des aliments augmentera et la possibilité de choix sera réduite. Un projet efficace de diffusion scientifique et d'éducation environnementale pourrait attirer l'attention sur l'importance des abeilles pour la pollinisation. Les messages qui pourraient être communiqués peuvent être résumés par les phrases suivantes : "*Sauvez les abeilles pour sauver le monde*" ou "*Nous avons besoin des abeilles, le contraire n'est pas vrai*". En plus de communiquer sur l'importance de la biodiversité florale, des activités pourraient être planifiées dans le but d'augmenter la surface occupée par les espèces sauvages utiles à la survie des pollinisateurs.^{232, 233, 862} L'aménagement d'espaces verts, de couloirs de végétation sauvage et la plantation de plantes attractives pourraient être prévus. L'éducation à l'environnement pourrait s'accompagner de la restauration des écosystèmes urbains et agraires. L'éducation écologique peut être transmise en plantant des plantes et en rendant plus vertes les zones abandonnées et dégradées. Devenir actif dans les lieux où l'on vit rend le processus d'éco-éducation beaucoup plus efficace.

Les abeilles peuvent être utilisées pour contrôler la qualité et la quantité de pollen et, par conséquent, peuvent être un indicateur de la santé de la biodiversité florale du territoire. Une activité complémentaire pourrait consister à mesurer la diversité florale à travers le pollen collecté par les abeilles ou dans le miel, avec l'aide d'experts.

3) Apiculture urbaine

L'installation de ruches à des fins éducatives, en utilisant des ruches construites à cet effet, est une stratégie qui est déjà utilisée depuis un certain temps. Pour confirmer l'intérêt de la verdure urbaine pour les apiculteurs, il a été estimé que la ville de Turin a un potentiel mellifère de 440.000 kg.³⁵

La société des abeilles, comme la société humaine, est composée d'individus qui ont besoin d'une organisation complexe pour survivre. Les intérêts des individus sont sacrifiés pour le bien collectif. Les abeilles ont inspiré la poésie, la littérature, l'art et la musique, notamment les métaphores italiennes "être occupé comme une abeille" et "les abeilles dans la société industrielle sont comme les canaris dans les mines". Montesquieu écrivait notamment "ce qui n'est point utile à l'essaim, n'est point utile à l'abeille". Des informations sur plusieurs aspects cruciaux de l'agriculture industrielle et durable (pesticides, biodiversité, engrais, réduction de la fertilité des sols, changement climatique) pourraient être promues.

En conclusion, parmi les organisations qui ont utilisé les abeilles pour promouvoir une meilleure culture environnementale et effectuer une biosurveillance, il convient de mentionner :

- Universités et centres de recherche ;
- Les administrations publiques (par exemple : les départements) ;
- Service de santé ;
- Organisations environnementales ;
- Fondations opérant dans le secteur de l'environnement ;
- Les associations professionnelles (par exemple, les associations agricoles) ;
- Les particuliers (par exemple dans la gestion des déchets, la production alimentaire et les énergies renouvelables).

Il existe de nombreux exemples d'applications de biosurveillance réalisées par les acteurs mentionnés ci-dessus, également en Italie.

PESTICIDES : DES CONNAISSANCES IGNORÉES SUR DES DANGERS CONNUS DEPUIS LONGTEMPS

SI TOUT A UN PRIX, L'ENVIRONNEMENT DEVIENT UN LUXE

On estime que les ennemis biologiques des plantes sont à l'origine de 45% des pertes alimentaires dans le monde. Au niveau mondial, les insectes, les autres parasites des plantes et les mauvaises herbes génèrent à eux seuls des pertes alimentaires de l'ordre de 30%. À ces pertes s'ajoutent encore 10 ou 20% dus aux êtres vivants qui causent des dommages après la récolte, comme les rongeurs, les micro-organismes (par exemple les moisissures) et les insectes.⁵⁸⁰ Autre aspect négatif, 30% des aliments en Italie finissent dans le flux des déchets alors qu'ils sont encore comestibles. Pour contrer et tenter de réduire ces pertes, des pesticides sont utilisés depuis plus de 60 ans, mais ils sont à l'origine de graves problèmes :⁵³⁷

- Les dommages causés à la santé humaine (aux États-Unis, en 2005, ces coûts ont été estimés à plus de 1,1 milliard de dollars par an).
- Les dommages causés par l'émergence de plantes et de parasites résistants aux pesticides (aux États-Unis, ces coûts ont été estimés à plus de 1,5 milliard de dollars par an).
- Les pertes de récoltes dues aux pesticides (aux États-Unis, ce coût a été estimé à environ 1,4 milliard de dollars par an).
- Les dommages causés à la biodiversité naturelle et en particulier aux oiseaux (aux États-Unis, les dommages causés aux oiseaux par les pesticides génèrent des coûts de 2,2 milliards de dollars par an).
- La contamination de l'eau (aux États-Unis, elle génère des coûts de plus de 2 milliards de dollars par an).
- Destruction des ennemis naturels des plantes.
- Réduction des pollinisateurs, notamment des abeilles.
- Dépenses relatives à la lutte contre l'utilisation massive et inappropriée des pesticides.
- Investissement dans la diffusion de la culture de l'agriculture chimique.

Les estimations sont données à titre d'exemple et ne donnent certainement pas la juste mesure du problème : il est très difficile d'estimer le coût engendré par l'extinction de certaines espèces sur des territoires plus ou moins vastes, ou sur la planète entière. C'est une vision anthropocentrique que de donner une valeur économique à tout, y compris à la santé humaine. Cette simplification repose sur un principe répandu dans le capitalisme, celui de pouvoir mettre un prix sur n'importe quoi et, par conséquent, de pouvoir tout acheter. De cette manière, la santé humaine et la protection de l'environnement deviennent automatiquement une marchandise et, en même temps, un luxe.

INTRODUCTION AUX DOMMAGES CAUSÉS PAR LES PESTICIDES

L'exposition aux pesticides peut se faire par ingestion (par exemple par les fruits), par contact et par inhalation (il existe également d'autres voies d'exposition indirectes comme l'exposition du fœtus). Voici quelques-unes des modifications générées par les pesticides chez les êtres vivants (il s'agit souvent d'effets secondaires car ils sont différents de l'action primaire, c'est-à-dire de l'action qui justifie l'utilisation agricole) : ⁷²⁴

- Modifications génétiques. Cancers du sang tels que les leucémies (par exemple, à la suite d'une exposition à des agents organochlorés tels que l'aldrine, le chlordane, le DDT, l'heptachlore, le lindane et à la suite d'une exposition au mancozèbe et au toxaphène) ; lymphomes non hodgkiniens [à la suite d'une exposition au lindane, à la cynazine, au 2-4D (acide 2,4-dichlorophénoxyacétique)] ; myélome multiple à la suite d'une exposition à diverses molécules telles que le glyphosate. Le mélanome n'est pas seulement lié à l'exposition au soleil, mais aussi à l'exposition aux pesticides, en particulier aux carbamates et au toxaphène. Le cancer de la prostate a été associé à l'exposition à certains pesticides tels que le bromure de méthyle et les organochlorés.
- Dysfonctionnement des mitochondries et du réticulum endoplasmique.
- Altérations des canaux ioniques entraînant des perturbations de la conduction nerveuse.
- Des troubles neurologiques et cognitifs tels que le syndrome de l'enfant distrait et trop agité, ou une intelligence réduite chez l'enfant (par exemple, en raison des insecticides organophosphorés).
- Modification de l'activité des enzymes (par exemple, acétylcholinestérase, cytochrome P450).
- Stress oxydatif.
- Modification de la capacité d'absorption des nutriments (par exemple, en modifiant la perméabilité des cellules).
- Des dommages au système immunitaire.
- Des dommages à la reproduction, tels que la réduction de la fertilité masculine.
- Perturbation endocrinienne (comme la thyroïde).
- Altérations de la santé de l'enfant dues à l'exposition in utero (otite, asthme, stress respiratoire, réduction de la croissance fœtale, réduction de la période de gestation, certains types de malformations). Par exemple, les composés organophosphorés ont été associés à une réduction de la circonférence de la tête à la naissance (une mesure indirecte d'un éventuel retard dans le développement du cerveau), à un retard de croissance, à une altération des capacités cognitives et à l'autisme. ¹²⁷¹

Ce ne sont là que quelques-unes des modifications produites par les pesticides, mais elles suffisent à mettre en évidence la multiplicité des maladies qu'ils peuvent provoquer.

Il est désormais très clair que les pesticides altèrent l'équilibre d'organismes tels que l'être humain, même à très faible dose, mesurée en millièmes de gramme : dysfonctionnements du système endocrinien, du système nerveux, du système reproductif, du système immunitaire, voire dysfonctionnements rénaux, respiratoires et cardiovasculaires. Par conséquent, il existe une corrélation entre l'exposition à cette catégorie de molécules et de nombreuses maladies telles que le cancer, la maladie de Parkinson, la maladie d'Alzheimer, l'autisme, le trouble déficitaire de l'attention avec hyperactivité, le diabète, la sclérose latérale amyotrophique (SLA), les problèmes de reproduction (par exemple, malformations fœtales, infertilité) et les dysfonctionnements de la thyroïde. ^{491, 500} Si l'exposition a lieu tôt dans la vie, les risques sont encore plus grands, comme la réduction du QI, les dysfonctionnements comportementaux, sensoriels et moteurs. ⁵¹⁶

DÉTERMINER LE NIVEAU DE RISQUE ACCEPTABLE

L'un des points cruciaux de l'évaluation des risques est la définition du seuil de risque acceptable. L'estimation doit tenir compte de diverses évaluations toxicologiques, épidémiologiques, mais aussi politiques, économiques et sociales. Dans certains contextes, comme la cancérologie, un risque peut être considéré comme acceptable, selon le cas, si l'augmentation attendue de la mortalité pour la population générale se situe entre un cas sur dix mille et un cas sur un million par an. Pour les travailleurs, ce niveau de risque est dans certains cas multiplié par 10 à 100.

Les voies d'exposition peuvent être :

- Inhalation et contact avec les matières en suspension dans l'air (cette exposition touche principalement les travailleurs).
- Ingestion directe (par l'eau et les aliments).
- Ingestion indirecte par la chaîne alimentaire (bioaccumulation, par exemple dans la viande et les produits carnés).

Afin de déterminer le niveau de risque acceptable, il peut être utile d'établir une valeur de pollution ou de contamination tolérable. Une valeur de référence seuil est la concentration la plus élevée à laquelle aucun effet nocif n'est mesuré (NOAEL, *no-observable adverse effect level*). Cette dose est dérivée de modèles expérimentaux. Certaines NOAEL calculées pour l'exposition par ingestion chez le rat, en parties par million, sont : mercure 15 ppm ; cadmium 25 ppm ; plomb 300 ppm ; nickel 500 ppm ; chrome 3.000 ppm. Dans de rares cas, la NOAEL peut être dérivée directement chez l'homme, par exemple à la suite d'expositions professionnelles. La concentration peut faire référence à l'exposition par ingestion, inhalation ou contact.

Une interprétation possible, en l'absence d'autres informations spécifiques, pourrait être que les matériaux contenant des concentrations de polluants inférieures à la NOAEL peuvent vraisemblablement être utilisés sans restriction. Cette conclusion présente les limites d'une approche qui ne tient pas compte de toutes les évaluations et interactions possibles. Il ne prend pas en compte les situations à risque particulier, comme celles des travailleurs ou des personnes vulnérables. Les effets cumulatifs ou les interactions entre différentes expositions ne sont pas évalués, et il est difficile de prévoir ce qui se passe à long terme.

La NOAEL, dans la plupart des cas, a la limite d'être estimée chez l'animal, pour de courtes périodes, pour une seule voie d'exposition et ne tient pas compte de la présence simultanée d'autres facteurs. C'est également pour ces raisons que les conclusions tirées des modèles animaux en laboratoire sont transférées à l'homme en appliquant des facteurs de sécurité (100-1.000) ; par exemple, pour calculer les concentrations qui peuvent être absorbées au cours d'une vie sans mesurer les effets néfastes sur la santé humaine.

Il faut garder à l'esprit que toute évaluation des risques sera toujours caractérisée par différents niveaux d'incertitude, en particulier lorsqu'il s'agit de prévoir les effets à faible dose (par exemple, les effets cancérogènes, endocriniens, sur la reproduction ou sur le système nerveux), à partir de substances multiples (par exemple, les produits phytopharmaceutiques) et sur toute une vie.

Un autre paramètre utilisé pour identifier les concentrations sûres est la TLV (*Threshold Limit Value*). Cet acronyme indique la valeur limite fixée (par exemple par l'ACGIH, *American Conference of Governmental Industrial Hygienists*) pour l'exposition à des substances ou des radiations en suspension dans l'air, et fournit une estimation de la concentration à laquelle les travailleurs peuvent être exposés quotidiennement sans effets néfastes sur la santé. En particulier, il définit :

- TLV-TWA (*Time Weighted Average*) : concentration moyenne pondérée dans le temps, sur une journée de travail conventionnelle de 8 heures et une semaine de travail de 40 heures, à laquelle la plupart des travailleurs peuvent être exposés de manière répétée, jour après jour, sans effets néfastes sur la santé.

- TLV-STEL (*Short Term Exposure Limit*) : Exposition moyenne pondérée sur une période de 15 minutes qui ne doit jamais être dépassée pendant la journée de travail, même si la moyenne pondérée sur 8 heures est inférieure à la TLV-TWA. Les expositions à la TLV-STEL ne doivent pas se produire plus de 4 fois par jour, avec au moins 60 minutes entre les expositions successives. On considère qu'il s'agit d'une concentration à laquelle les travailleurs peuvent être exposés en permanence, pendant de courtes périodes, sans subir d'effets irritants, chroniques ou irréversibles. Habituellement, cette valeur d'exposition (concentration) est plus élevée que la TLV-TWA.

- *TLV-plafond* (TLV-C, *limite plafond*) : est la concentration qui ne doit pas être dépassée pendant l'activité professionnelle, même pour une très courte période de temps.

Certaines personnes peuvent être plus sensibles à l'exposition à certaines substances et, par conséquent, ne pas être suffisamment protégées lorsque les concentrations sont inférieures aux VLEP, et ce pour plusieurs raisons : prédisposition génétique, âge, exposition antérieure, médicaments, tabagisme, alcool, drogues et sous-estimation des risques (connaissances insuffisantes).

Un autre acronyme utilisé en toxicologie est TEQ ou équivalent toxique. Il s'agit d'une grandeur toxicologique qui exprime la concentration d'une substance nocive en termes de quantité équivalente à un composé avec lequel elle peut être comparée. Le TEQ exprime la quantité d'un contaminant comme la concentration de la substance de référence, qui est capable de générer les mêmes effets toxiques. Le TEQ est lié à la concentration réelle d'une substance donnée par le biais du *facteur d'équivalence toxique* (TEF), qui, multiplié par la concentration réelle, donne le TEQ. En d'autres termes, un gramme de la substance A, qui est deux fois plus toxique que la substance B, a le même *équivalent toxique* que deux grammes de la substance B. L'équivalent toxique est couramment utilisé pour quantifier les dioxines et les composés apparentés ou assimilés, tels que les furanes. Les limites légales d'émission de ces substances utilisent également l'unité de mesure communément exprimée en ng/Nm³ (nanogrammes, c'est-à-dire milliardièmes de gramme, par mètre cube dans des conditions normales, c'est-à-dire à température et pression fixes) de toxicité équivalente au tétrachloro-dibenzo-p-dioxine. L'Organisation mondiale de la santé a identifié au moins 17 dibenzo-p-dioxines/polychlorodibenzofuranes polychlorés nocifs et 12 polychlorobiphényles, en leur attribuant un facteur d'équivalence toxique par rapport à la tétrachloro-dibenzo-p-dioxine (TCDD), la plus dangereuse des dioxines (il y a au moins 210 dioxines identifiées).

Une attention particulière doit être accordée aux utilisateurs professionnels de pesticides et aux travailleurs des usines de production. En Lombardie, certains herbicides sont utilisés dans la culture du riz et du maïs (molinate, propanil et terbuthylazine), qui occupent des centaines de milliers d'hectares. Les agriculteurs sont exposés aux pesticides durant différentes phases telles que la préparation du mélange dans l'équipement de distribution (par exemple le pulvérisateur), la distribution, les activités réalisées dans les zones où les substances ont été distribuées et le nettoyage des équipements et dispositifs utilisés. Les opérateurs peuvent absorber par la peau et la respiration des molécules contenues dans les pesticides, qui peuvent être retrouvées dans les urines (par exemple : le propanil et son dérivé, la 3,4-dichloroaniline ou 3,4-DCA ; la terbuthylazine et son dérivé, la des-éthyl-terbuthylazine ou DET). Les molécules dangereuses peuvent pénétrer dans l'organisme par la peau (par exemple les mains). Pour démontrer le danger de cette voie d'exposition, on retrouve certains pesticides dans l'urine d'ouvriers agricoles qui les ont épandus sur des cultures de riz ou de maïs en Lombardie. ¹²⁵³ Jusqu'à 3 mg de matière active peuvent être déposés sur le corps des travailleurs pour chaque kilogramme utilisé

(le corps et les vêtements peuvent être contaminés par plusieurs dizaines de millilitres de solution contenant le mélange). La contamination professionnelle des agriculteurs peut dépasser le niveau d'exposition considéré comme tolérable (*niveau acceptable d'exposition de l'opérateur* ou NAEO). Ces molécules peuvent également être retrouvées dans les urines de la population générale (3,4-dichloroaniline qui est un métabolite du propanil jusqu'à une concentration de 6,2 µg/L).

L'imidaclopride et un métabolite de l'imidaclopride (acide 6-chloronicotinique) peuvent être trouvés dans tous les échantillons d'urine des travailleurs agricoles examinés (46 agriculteurs chinois).¹²⁵⁷ On estime que l'absorption quotidienne d'imidaclopride par les utilisateurs varie de 0,52 à 248,05 µg/kg, alors que la dose indicative à ne pas dépasser chez un adulte est de 60 µg/kg par jour : il s'ensuit que les utilisateurs de cette molécule en agriculture peuvent atteindre des niveaux de contamination certainement dangereux pour la santé.¹²⁵⁷ Cet insecticide néonicotinoïde est présent dans l'urine même avant l'application dans les champs, mais après cette opération, la concentration dans l'urine augmente de 3 à 4 fois. En Chine, les molécules néonicotinoïdes sont enregistrées avec une fréquence élevée dans les fruits et légumes, de sorte que l'exposition alimentaire de la population générale est également significative.

LES PESTICIDES SONT DES SUBSTANCES TOXIQUES

Les pesticides sont des substances toxiques, persistantes, mobiles et bioaccumulables qui ont un impact négatif sur les propriétés du sol et sur l'ensemble de l'écosystème. En Italie, on distribue en moyenne entre 5 et 6 kg de pesticides par hectare chaque année. Par conséquent, des résidus de pesticides sont présents dans au moins la moitié des fruits et légumes qui arrivent chaque jour dans nos assiettes et dans l'eau potable. Au moins 131 ingrédients actifs et leurs métabolites ont été identifiés dans l'eau potable en Italie, et 36,6% des échantillons ont été contaminés au-delà des niveaux maximums de sécurité qui ont été fixés.⁷²⁴

Malheureusement, il est très difficile de prouver une relation de cause à effet entre la maladie et la profession, entre le mode de vie et la maladie ou entre la contamination environnementale et les problèmes de santé. Dans certains cas, des effets ont été signalés même à des doses infinitésimales : pour l'atrazine, des effets ont été décrits à des doses 30.000 fois inférieures aux limites légales.⁷²⁴

Une des limites de l'analyse des risques est que les effets sont évalués pour chaque substance active individuelle, même si nous sommes en réalité exposés à des mélanges de molécules. Dans certains cas, les effets ne se manifestent qu'après de nombreuses années ou même dans la génération suivante, alors que les études toxicologiques sont réalisées sur de courtes périodes et à des doses généralement plus élevées que celles auxquelles nous sommes réellement exposés. Par exemple, l'insecticide organochloré DDT, qui est interdit depuis des années, est toujours présent dans les matrices environnementales et est lié à un risque accru de cancer du sein en cas d'exposition à l'âge prépubère.

Le risque accru de maladies neurodégénératives chez l'adulte, comme la maladie de Parkinson, à la suite de la consommation d'eau contaminée par des pesticides tels que le chlorpyrifos et les dommages causés à la glande thyroïde par l'exposition au mancozèbe sont particulièrement graves. En Italie, les lymphomes dans la tranche d'âge 0-14 ans présentent une augmentation annuelle supérieure à l'augmentation annuelle moyenne en Europe. Les tristes résultats de l'Italie en ce qui concerne l'incidence du cancer chez l'enfant, en particulier des lymphomes, devraient nous inciter à réfléchir sérieusement. En particulier dans les phases cruciales du développement, comme la vie intra-utérine ou la petite enfance, certaines substances agissent à des doses infinitésimales. Malheureusement, les pesticides sont désormais présents en permanence dans

notre environnement, notamment dans l'eau, et dans notre corps : dans le lait maternel, l'urine, le cordon ombilical et le sang. Nous sommes donc exposés toute notre vie et même avant notre naissance. Il convient de rappeler (rapports ISPRA sur l'eau) que les plus de 150.000 tonnes de pesticides pulvérisés chaque année en Italie ont contaminé non seulement les eaux de surface, mais aussi les eaux souterraines et l'eau potable. L'exposition aux pesticides favorise les maladies chroniques et divers types de problèmes tels qu'un poids inférieur des nouveau-nés, la présence de malformations congénitales et une diminution du nombre de spermatozoïdes.

Les organophosphorés peuvent agir comme des perturbateurs endocriniens, les organochlorés ont été liés au cancer, aux dommages neurologiques et aux problèmes endocriniens. Les malformations congénitales, les troubles de l'apprentissage et l'autisme sont également influencés par les mélanges chimiques nocifs auxquels nous sommes exposés avant même notre naissance.

Il est également difficile de déterminer l'association entre la contamination d'une molécule unique et une maladie en raison de l'exposition concomitante à d'autres catégories de substances qui peuvent avoir des effets différents, comme la neurotoxicité des polychlorobiphényles chez les enfants ou du manganèse chez les adultes (peut entraîner le parkinsonisme).³²⁷

De nombreuses études montrent une association entre l'agriculture chimique, les pesticides, les maladies et les catastrophes de la biosphère. Par exemple, les pyréthroïdes peuvent être détoxifiés par des systèmes enzymatiques qui, s'ils sont inhibés, augmentent la toxicité.¹⁹³ Les pyréthroïdes (comme la perméthrine) génèrent plusieurs effets indésirables chez les mammifères :

- neurotoxiques,
- génotoxique et cytotoxique,
- immunotoxique,
- reproduction,
- au foie,
- au système digestif,
- au cœur.

Les pyréthroïdes sont présents chez les mammifères sauvages tels que les dauphins (dans le foie, le placenta et le lait), ce qui confirme qu'ils sont mobiles, persistants et bioaccumulables.

Certains effets des pesticides enregistrés dans la littérature scientifique sont résumés ci-dessous : 160, 261, 280, 282,283, 286, 287, 288, 289, 290, 293, 297, 298, 299, 300, 301, 302, 321, 336, 477, 491, 495, 502, 505, 509, 515, 516, 528, 724, 725, 1254, 1256

- L'exposition à des pesticides tels que certains herbicides, fongicides et insecticides provoque des dommages à l'ADN, et des interactions dangereuses entre ces substances et au moins 300 gènes différents ont été identifiées (certaines de ces substances sont cancérogènes). Il a été démontré que certains gènes sont altérés par la présence de certains pesticides, confirmant une action mutagène qui est l'une des étapes de la transformation tumorale des cellules. Les enfants, en raison de leur constitution différente, ont un risque d'enregistrer des tumeurs jusqu'à 10 fois plus élevé que les adultes.
- Le glyphosate (herbicide) est un cancérogène probable pour l'homme selon l'Organisation mondiale de la santé.
- Le propoxur et la perméthrine provoquent une translocation chromosomique, qui consiste à déplacer des morceaux d'ADN contenant jusqu'à des centaines de gènes vers d'autres chromosomes, provoquant des altérations graves et souvent mortelles.
- L'utilisation de pesticides dans la maison immédiatement avant la conception, pendant la grossesse et immédiatement après augmente le risque de leucémie d'enregistrement chez les enfants (par exemple, ceux utilisés dans les jardins ou les

insecticides pour les mouches, les moustiques, les cafards ou les fourmis dans la maison ; les pesticides utilisés sur les animaux domestiques avec des savons).

- Les femmes qui travaillent avec des pesticides sont plus susceptibles d'avoir un cancer de l'ovaire et un cancer de la peau.
- L'utilisation professionnelle de pesticides favorise certaines maladies telles que les lymphomes non hodgkiniens, les myélomes multiples, le cancer du sein, le cancer des ovaires, l'eczéma et les maladies neurologiques.
- Certains pesticides (herbicides phénoxy, insecticides à base de carbamate, insecticides organophosphorés et organochlorés tels que le lindane) ont été associés au lymphome non hodgkinien, tandis que les herbicides (glyphosate et herbicides phénoxy) ont été liés aux lymphomes à cellules B.
- Des études menées aux États-Unis et en Espagne ont déterminé l'association entre l'agriculture intensive et les cancers de l'enfant.
- L'exposition des parents, en particulier des mères pendant la grossesse, augmente la probabilité de tumeurs cérébrales chez leurs enfants. L'exposition professionnelle des pères augmente également le risque chez leurs enfants, et cette augmentation est importante car l'exposition professionnelle est très souvent plus fréquente chez les hommes.
- L'exposition des parents aux pesticides avant la conception a des conséquences négatives pour la génération suivante et parfois pour leurs petits-enfants, telles que des modifications du système reproducteur et des cellules germinales, des tumeurs cérébrales et d'autres types de cancer. L'exposition professionnelle des mères à certains pesticides pendant la grossesse ou des pères avant la conception augmente le risque d'enregistrer des leucémies chez leurs enfants (cancers qui peuvent être enregistrés avant l'âge de cinq ans).
- L'exposition des mères à certains pesticides a été associée à des anomalies congénitales (carbaryl, chlorpyrifos, diazinon, atrazine, bromure de méthyle, DDT, HCH, DDE, aldicarbe, diméthoate et phorate). L'insecticide organophosphoré diazinon génère une neurotoxicité, un stress oxydatif, une cardiotoxicité et une toxicité vasculaire. Les métabolites du diazinon peuvent être trouvés dans l'urine des enfants américains. Les effets toxiques du diazinon ont la caractéristique de se produire sélectivement, plus facilement et plus intensément chez les souris mâles que chez les femelles. Dans ce cas, l'effet négatif sur la santé est lié au sexe.
- La présence de l'herbicide atrazine dans l'eau potable (aux États-Unis, on le trouve dans 94% des échantillons) a été associée à des malformations congénitales, à une baisse de la fertilité et à des cancers.
- Les femmes exposées à l'endosulfan pendant leur grossesse sont plus susceptibles d'avoir des enfants autistes.
- L'exposition à certains pesticides tels que les insecticides organochlorés a été associée à une puberté précoce chez les femmes (par exemple, apparition de seins) et, chez les hommes, à l'incapacité d'un ou des deux testicules à descendre dans le sac scrotal (appelée cryptorchidie).
- Les filles exposées au DDT avant la puberté ont cinq fois plus de risques de développer un cancer du sein.
- Les enfants exposés au chlorpyrifos pendant la grossesse présentent des modifications de l'architecture cérébrale.
- Des dommages cognitifs et neurodéveloppementaux ont également été documentés : une étude menée en Californie entre 1998 et 2010 (sur 2 961 cas d'autisme et 29.610 individus sains), a associé l'exposition des mères, causée par le fait de vivre à moins

de 2 km de zones agricoles, à une augmentation du risque allant de +10% à +16% pour le glyphosate, le chlorpyrifos, le diazon, le malathion, l'ivermectine et la perméthrine ; dans les 445 cas d'autisme associé à une déficience intellectuelle, les risques étaient significativement plus élevés (+33% pour le glyphosate, +27% pour le chlorpyrifos, +41% pour le diazon, +46% pour la perméthrine).

- Une étude menée en Californie sur 238 couples mère-enfant a associé l'utilisation d'insecticides organophosphorés à moins d'un kilomètre de leur résidence pendant la grossesse à une réduction du QI de leurs enfants.
- L'exposition aux insecticides organophosphorés pendant la grossesse augmente la probabilité de mort fœtale et l'exposition aux herbicides (chlorophénoxy) augmente les cas de fausses couches. L'exposition maternelle aux pesticides est associée à un poids réduit à la naissance et à un accouchement précoce, comme c'est le cas pour les insecticides organophosphorés (chlorpyrifos et diazinon). Certaines anomalies congénitales ont été associées à l'exposition maternelle aux fongicides et aux herbicides.
- Les agriculteurs qui utilisent des pesticides sont plus susceptibles d'avoir des tumeurs de la prostate et du cerveau et de souffrir de la maladie de Parkinson que la population générale : la dieldrine, le diquat, le paraquat, la roténone, le manèbe, les éthylène-bis-dithiocarbamates, les organo-phosphorés et les pesticides organochlorés ont montré une forte association avec la maladie de Parkinson.
- Les insecticides organochlorés, tels que le DDT et le lindane, multiplient par 2,4 la probabilité d'être atteint de la maladie de Parkinson.
- Vivre à moins de 500 m de champs traités avec le fongicide manèbe et/ou l'herbicide paraquat (association montrée en Californie) augmente le risque de contracter la maladie de Parkinson. Le risque augmente en cas d'exposition simultanée aux deux molécules.
- Aux États-Unis, une probabilité accrue de maladie de Parkinson a été démontrée à la suite d'une exposition au glyphosate, qui est utilisé à moins d'un kilomètre du domicile ; on a également constaté une augmentation des troubles cognitifs en relation avec une exposition antérieure aux insecticides organophosphorés. Aux Pays-Bas, le fait de vivre à moins de 100 mètres de champs entraîne une augmentation de la maladie de Parkinson en raison de l'exposition à 21 substances, dont le paraquat. Le paraquat est un herbicide non sélectif à action desséchante, utilisé dans la préparation des lits de semis ou de repiquage, dans l'inter-rang des cultures arboricoles, dans les talus, les drains et les bords de route. L'empoisonnement au paraquat peut entraîner une insuffisance respiratoire aiguë. Des études ont confirmé que le paraquat peut entraîner un risque accru de maladie de Parkinson dans la population vivant à proximité des terrains traités. Compte tenu du danger avéré, l'Union européenne a interdit sa commercialisation et son utilisation dans l'UE. Le produit est toujours fabriqué en Europe pour être exporté vers des marchés où son utilisation n'est pas interdite.
- Les pesticides altèrent également le système immunitaire et perturbent ses réactions. Parmi les molécules capables d'endommager le système immunitaire figurent les organochlorés tels que le DDT, le lindane, l'endosulfan et la dieldrine.
- Les pesticides favorisent les allergies et les réactions auto-immunes ; dans ce dernier cas, le système immunitaire perd la capacité de distinguer les cellules étrangères de ses propres cellules et tue ces dernières. Parmi les molécules pour lesquelles certaines études depuis les années 1990 ont mis en évidence une causalité entre l'exposition et les effets (par exemple les manifestations cutanées professionnelles)

figurent l'atrazine, le parathion, le manèbe et le dichlorvos. Dans les pays industrialisés, la prédisposition à développer une allergie touche entre 20 et 30% de la population.

- Aux États-Unis, on a constaté que le fait de vivre à moins de 500 mètres de lieux où sont utilisés le 2,4-D, le paraquat et la pendiméthaline entraîne une augmentation des malformations urogénitales. L'exposition au glyphosate, à la cyhalothrine, au S-métolachlore, au mépiquat et à la pendiméthaline a entraîné une augmentation des malformations cardiaques.
- En Andalousie, une augmentation des fausses couches, un poids réduit à la naissance et des malformations urogénitales masculines ont été observés à la suite de l'utilisation de pesticides perturbateurs endocriniens.
- Les insecticides organochlorés ont été associés à une probabilité accrue d'obésité.
- L'herbicide atrazine modifie l'action des lymphocytes chez les rats et altère la capacité de résistance aux infections chez les saumons.
- Chez les cétacés et les phoques, des problèmes du système immunitaire ont été associés à la présence de pesticides persistants. Cette alarme a été tirée depuis les années 1990.
- Les mâles de certaines grenouilles exposées aux pesticides deviennent des femelles.
- Les pesticides sont également à l'origine d'au moins 0,5% des maladies enregistrées chez les animaux par les vétérinaires et de 0,04% de tous les décès signalés : ces chiffres sous-estiment le problème car, par exemple, ils ne concernent que les cas d'animaux empoisonnés enregistrés par les services vétérinaires.

La liste pourrait être longue, mais outre les effets sur la santé, il ne faut pas négliger l'impact énorme que le modèle agricole actuel des pays industrialisés a sur la planète entière. Le système de production alimentaire représente un risque mondial, menaçant les écosystèmes et la stabilité du système terrestre.

Avec une certitude raisonnable, il est possible d'affirmer que la relation entre les pesticides et la santé humaine a fait l'objet de recherches approfondies et que, notamment en ce qui concerne les dommages neuropsychologiques chez les enfants et les risques de cancer (en particulier les cancers hématologiques), un lien de causalité est difficilement discutable.⁷²⁴

Dans de nombreux cas, l'absence de certitude sur les relations de causalité supprime la responsabilité, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de prise de responsabilité de la part des entreprises fautives. Cela signifie qu'en cas d'enregistrement d'une maladie professionnelle, il ne sera pas possible de recevoir une indemnisation pour le préjudice subi. Cette situation de fait assure l'impunité des producteurs de poisons et encourage la sous-déclaration des maladies environnementales. Il convient de remarquer que, dans de nombreux cas, la composition de toutes les molécules qui entrent dans la composition d'un pesticide n'est pas connue, car ces informations peuvent être protégées par le secret industriel et d'autres règles qui protègent les intérêts économiques d'acteurs très puissants. Le principe de droit selon lequel il existe une présomption d'innocence jusqu'à ce que la culpabilité soit prouvée s'applique. À l'heure actuelle, tous les écosystèmes sont contaminés par les pesticides et, par conséquent, nos tissus aussi, si bien qu'il devient difficile d'identifier les responsabilités individuelles. En Italie, la consommation de pesticides par hectare est parmi les plus élevées d'Europe : environ 33% de tous les insecticides utilisés en Europe. Selon une institution qui fait autorité (l'Endocrine Society), nous sommes exposés quotidiennement à plus de 85.000 substances créées artificiellement et seul environ 1% de ces molécules dispose d'informations sur leur sécurité. Une contamination massive, étendue et constante constitue un obstacle majeur à la recherche des responsables et crée un bouclier protecteur efficace mais en même temps mortel.

La solution existe et c'est l'agro-écologie, c'est-à-dire un modèle qui doit pouvoir répondre à la durabilité environnementale, économique et sociale en utilisant le moins possible de ressources externes : pesticides, engrais, combustibles fossiles et irrigation. Il convient de promouvoir des systèmes agricoles fondés sur la biodiversité, l'agriculture familiale, les chaînes d'approvisionnement courtes, les ressources locales et l'échange de connaissances entre les exploitants, les citoyens et les scientifiques. Non seulement des valeurs fondamentales telles que la protection de la santé, la biodiversité, les ressources en eau, la fertilité des sols et le climat sont en jeu, mais aussi la participation, la démocratie et la paix sociale.

Le droit européen a protégé les grands intérêts privés de manière dangereuse. Les entreprises ont été autorisées à ne pas divulguer le lieu de production des denrées alimentaires, à ne pas indiquer les ingrédients, à ne pas fournir d'informations sur l'éthique, l'environnement et la protection des travailleurs.⁸⁴⁵ Par conséquent, les consommateurs sensibles à l'écologie ont été privés de la possibilité de reconnaître les produits locaux et de sélectionner les entrepreneurs les plus attentifs et les plus prévoyants. L'obligation de sécurité alimentaire a donc été une grande arnaque médiatique qui a conduit dans la direction opposée : l'absence d'information pour les consommateurs et la liberté d'action pour les entrepreneurs peu scrupuleux.⁷⁵²

LES PESTICIDES INTERFÈRENT AVEC LE SYSTÈME HORMONAL

Il est à la fois intéressant et inquiétant d'examiner de plus près certains des effets générés par les pesticides et autres substances qui agissent comme des perturbateurs endocriniens.²¹¹ Les perturbateurs endocriniens sont des substances fabriquées par l'homme qui altèrent d'importantes fonctions physiologiques des animaux et des plantes, à de très faibles concentrations, en imitant des molécules naturelles telles que les hormones. Les hormones sont des substances qui agissent en activant ou en désactivant des mécanismes fondamentaux et qui remplissent ces fonctions à des doses très faibles. Le moment de l'exposition est crucial pour déterminer les effets qui peuvent se manifester de nombreuses années plus tard et même dans la génération suivante. Pendant la croissance, il existe des fenêtres de vulnérabilité très sensibles.

Les perturbateurs endocriniens interfèrent avec les mécanismes d'action de plus de 50 hormones produites par les glandes de notre corps : ils peuvent inhiber les hormones ou déclencher des mécanismes au mauvais moment et avec une intensité différente. Ils peuvent inhiber des hormones ou déclencher des mécanismes au mauvais moment et avec une intensité différente. Ils produisent de faux messages qui peuvent interférer avec des fonctions clés telles que les fonctions cérébrales ou reproductives (par exemple, diminuer la quantité de spermatozoïdes par millilitre de sperme) : des années 1940 aux années 1990, les recherches montrent que le nombre de spermatozoïdes a diminué de moitié.²⁸⁰ Les insecticides organochlorés (aldrine, DDT, HCH, heptachlore, chlordane, endosulfan) ont une structure apparentée aux hormones stéroïdes et agissent sur les mêmes récepteurs.⁴⁴³

Comme les hormones naturelles, les perturbateurs endocriniens se caractérisent par le fait qu'ils n'ont pas de seuil d'activation et qu'ils peuvent également avoir des effets néfastes sur la progéniture. Il s'agit d'un groupe hétérogène de substances fabriquées par l'homme qui peuvent interférer par divers mécanismes (médiés par les récepteurs, métaboliques, etc.) avec le fonctionnement du système endocrinien, en particulier avec l'homéostasie des stéroïdes sexuels et de la thyroïde.⁷²⁴ Des milliers de molécules différentes sont impliquées, notamment des pesticides, des retardateurs de flamme, des polychlorobiphényles (PCB), des phtalates ou du bisphénol A, utilisé dans l'industrie plastique.⁴⁶⁸ Au moins un million de tonnes de bisphénol A sont utilisées chaque année en Europe. Le bisphénol A agit à des concentrations infimes comme un perturbateur endocrinien : il affecte la fertilité, favorise l'obésité, augmente le risque de

certains cancers tels que ceux de la prostate et du sein, et favorise les maladies nerveuses.⁹⁸² Le bisphénol A est ajouté aux plastiques utilisés pour les boissons ou pour envelopper l'intérieur des boîtes de conserve (de tomates, par exemple) et, par conséquent, on le retrouve dans 93% des échantillons d'urine (de 2.517 Américains).⁸³⁷

En résumé, les principaux dommages à la santé humaine enregistrés par les perturbateurs endocriniens sont les suivants :^{464, 501, 502}

- des dommages au système immunitaire tels que les troubles auto-immuns ;
- certaines formes d'obésité ;
- les maladies cardiaques et pulmonaires ;
- le dysfonctionnement nerveux, troubles du comportement et *déficits* cognitifs ;
- les maladies neurodégénératives ;
- le risque accru de cryptorchidie^I et d'hypospadias ;^{II}
- le dysfonctionnement de la reproduction tel qu'une baisse de la fertilité masculine ;
- les défauts de naissance ;
- les fausses couches, endométriose^{III}, grossesse extra-utérine, naissance prématurée ;
- un risque accru de cancers tels que le cancer de la prostate, du poumon et du sein (le risque de cancer du sein est multiplié par 4 au moins chez les femmes qui ont des métabolites du DDT dans le sang ; chez les travailleurs agricoles exposés aux organochlorés, le risque de cancer de la prostate augmente) ;
- le dysfonctionnement hormonal (en particulier de la thyroïde) et développement pubertaire précoce ;
- le diabète.

Une association entre l'utilisation de certains pesticides, pendant au moins 100 jours au cours d'une vie, et une probabilité accrue de diabète a été enregistrée (aldrine, chlordane, heptachlore).

⁵⁰⁰ D'autres molécules ont également été associées au diabète (organophosphorés et organochlorés notamment) : DDE, DDT, HCB, oxychlordane, heptachlore, β -HCH, mirex, aldrine, dieldrine, chlordane, alachlore, pentachlorophénol, parathion, phorate, phonophos, trichlorfon, cyanazine ; et des herbicides comme le 2,4,5-T/2,4,5-TP).^{491, 511, 1159}

Ce sont là quelques-uns des problèmes que peuvent engendrer les centaines de molécules produites en grande quantité par l'industrie chimique. Nombre de ces agents sont également connus pour leurs effets mutagènes et cancérigènes. La surveillance a montré une augmentation significative des cancers du sein dès les années 1990 : d'un cas pour 20 femmes en 1960 à un cas pour 8 femmes en 1995.⁵⁰²

Certaines des caractéristiques les plus importantes des mécanismes d'action des perturbateurs endocriniens sont les suivantes :

^I La cryptorchidie est l'anomalie la plus fréquente du système urogénital masculin dans l'enfance et peut être associée à d'autres anomalies de l'appareil génito-urinaire. Pendant la vie fœtale, le testicule descend de la cavité abdominale vers le scrotum en passant par le canal inguinal, mais il peut s'arrêter à n'importe quel moment de sa descente. Cela s'accompagne d'une altération de la structure du testicule, d'une réduction de la production de spermatozoïdes et d'une diminution de la production d'hormones à l'âge adulte, ce qui nuit à la fertilité et à la santé générale. Les facteurs de risque sont la prématurité et le faible poids de naissance, ainsi que le diabète pendant la grossesse et le tabagisme. Les causes de la cryptorchidie sont hormonales, génétiques et environnementales.⁷²⁶

^{II} L'hypospadias est une anomalie congénitale du pénis due à un développement insuffisant de l'urètre, dont la sortie (méat) n'est pas située à l'apex du gland mais sur la face ventrale du pénis ou, dans les cas les plus graves, dans le scrotum ou le périnée.⁷²⁷

^{III} L'endométriose est la présence d'endomètre, la muqueuse qui recouvre normalement uniquement la cavité utérine, à l'extérieur de l'utérus. Elle peut toucher les femmes dès leurs premières règles (ménarches) et les accompagner jusqu'à la ménopause. En Italie, 10 à 15% des femmes en âge de procréer sont touchées par l'endométriose; la maladie touche environ 30 à 50% des femmes infertiles ou ayant des difficultés à concevoir. Au moins 3 millions de femmes ont une endométriose diagnostiquée.⁷²⁸

- Ils agissent à très faible dose.
- Ils agissent de manière très précise et pendant des fenêtres de temps spécifiques.
- Les enfants et les premiers stades de la reproduction peuvent être beaucoup plus vulnérables.
- Les effets peuvent être mesurés dans les générations qui suivent celle qui a été exposée.
- Les doses jugées tolérables par la réglementation (par exemple, les concentrations maximales autorisées de substances actives de pesticides dans les aliments) ont été déterminées sans tenir compte du risque endocrinologique et sont donc incapables de protéger notre santé contre ces dangers. Les concentrations auxquelles les perturbateurs endocriniens génèrent des effets biologiques significatifs peuvent être beaucoup plus faibles que celles établies en évaluant, par exemple, la dose qui génère la mort de 50% des animaux (en quelques heures).⁶⁶⁸ Les concentrations capables de générer des effets endocriniens sont plus de mille fois inférieures à celles capables de produire des effets toxiques aigus. En outre, les études épidémiologiques sur les perturbateurs endocriniens sont difficiles à réaliser, car pour certaines catégories (par exemple, les molécules qui interfèrent avec les œstrogènes), il est devenu impossible de trouver des échantillons de personnes non exposées, étant donné qu'il s'agit de polluants omniprésents. Les modèles expérimentaux actuels appliqués par les entreprises avant la mise sur le marché des pesticides ne permettent pas d'évaluer les effets endocriniens.
- Des effets endocriniens se produisent également chez les animaux. Par exemple, les grenouilles mâles exposées à 25 parties par milliard d'atrazine (herbicide) voient leur concentration de testostérone divisée par 10.⁵¹⁶ Cette réduction est probablement due à l'activation d'une protéine (l'enzyme aromatasase) qui transforme la testostérone en œstrogènes.

Un grand nombre des effets enregistrés chez l'homme sont similaires à ceux déterminés chez les abeilles et décrits ci-dessus : il s'agit d'effets sublétaux, c'est-à-dire résultant d'expositions à très faible dose pendant toute la durée de la vie. L'évaluation des risques pour les abeilles et les humains souffre des mêmes limites, car il est difficile de prévoir les conséquences à long terme pour l'ensemble de la communauté en laboratoire. De plus, les effets additifs et synergiques ne peuvent être déterminés à l'avance en laboratoire, et il est impossible de penser disposer à l'avance d'informations sur les dommages générés par des centaines de milliers d'espèces sauvages. Ainsi, comme dans le cas des insectes, nous jouons le rôle de cobayes, car pour la plupart des polluants avec lesquels nous sommes en contact quotidiennement, nous ne disposons pas de connaissances suffisantes pour nous rassurer. Au contraire, de nombreuses sonnettes d'alarme ont été tirées depuis longtemps, tant en ce qui concerne les effets sur les pollinisateurs que sur les humains et l'ensemble de la biosphère.

Plus de 1.000 molécules sont connues pour être des perturbateurs endocriniens potentiels en raison de leurs caractéristiques chimiques, comme le diéthylstilbestrol, les polychlorobiphényles (PCB), les dioxines, les composés perfluoroalkyles, les solvants, les phtalates, les éthers diphényles polybromés et certains pesticides, dont le lindane et la diédrine, DDT, DDE (insecticides organochlorés), fongicides (vinclozoline, prochloraz et linorun), triazoles (cyproconazole), imidazoles (imazalil), herbicides (simazine et atrazine), organo-phosphorés (chlorpyrifos), dithiocarbamates (mancozeb), co-formulants de pesticides tels que les alkylphénols.^{468, 500, 501, 516, 598} Les pesticides suivants sont également des perturbateurs endocriniens certains :alachlore, aldicarbe, bénomyl, chlordécone, chlorpyrifos-méthyle, dicofol, endosulfan, mancozèbe, méthoxyclore, nitrphène, procymidone, toxaphène, vinclozoline, 2,4-D.^{260, 309} Au moins 105 pesticides ont été reconnus comme des perturbateurs endocriniens : 46% sont des insecticides, 31% des fongicides et 21% des herbicides.⁴⁶⁴ Pour avoir une meilleure représentation de la gravité, il est utile de souligner qu'au Danemark, par

exemple, on estime qu'au moins 50% des fongicides utilisés sont des perturbateurs endocriniens (par exemple, ils inhibent la biosynthèse de l'ergostérol).⁵⁹⁸

Dans certains cas, les métabolites sont plus dangereux que les molécules de départ. Par exemple, la vinclozoline dans le sol, les plantes et les animaux forme des produits de dégradation qui ont une activité anti-androgène.⁴⁶⁴

Des traces de perturbateurs endocriniens, tels que les molécules contenues dans les plastiques ou les pesticides, peuvent être trouvées dans la plupart de nos corps. L'exposition à des doses supplémentaires d'hormones provenant de la nourriture ou de l'eau contaminée modifie les équilibres délicats. L'effet de l'exposition à un mélange complexe pendant toute une vie ne doit pas être sous-estimé. Les effets synergiques et additifs sont largement inconnus. Ces substances peuvent agir sur la femme enceinte, le fœtus et les cellules reproductrices du fœtus, et les effets peuvent se manifester chez les petits-enfants, c'est-à-dire sur trois générations.

Selon l'Endocrine Society, l'exposition à des pesticides tels que les pesticides organochlorés (DDT) contribue à accroître le risque de maladies cardiaques.⁴⁶⁷ L'association entre l'exposition aux pesticides organochlorés, les malformations congénitales et le risque accru de diabète de type 2 a été mise en évidence. La présence de perturbateurs endocriniens œstrogéniques dans le sang augmente les complications de l'obésité, telles que les maladies cardiaques et les processus inflammatoires.⁴⁶⁷ L'herbicide le plus utilisé au monde, le glyphosate, s'est également révélé être un perturbateur endocrinien chez l'homme (il modifie l'activité de l'aromatase) et ailleurs.⁵⁵²

Les perturbateurs endocriniens peuvent perturber des équilibres fragiles en favorisant l'obésité et les troubles du comportement. Par exemple, chez les enfants, la fréquence de l'autisme et des troubles connexes a été multipliée par 50 en moins de 40 ans.⁴⁶³

Les perturbateurs endocriniens ont été liés à une baisse du QI, qui peut être associée à un handicap, à l'autisme, à un déficit d'attention et à l'hyperactivité. Les autres maladies pour lesquelles une association avec les perturbateurs endocriniens a été enregistrée sont l'obésité, le diabète et l'infertilité masculine.⁵⁰¹ En Europe, le préjudice économique causé par les perturbateurs endocriniens est estimé à des centaines de milliards d'euros par an (au moins 1,2% du PIB ou produit intérieur brut).

LES PESTICIDES ET LA THYROÏDE

L'exposition professionnelle (par exemple : agriculteurs qui les distribuent) aux insecticides organochlorés (aldrine, chlordane, DDT, heptachlore, lindane), aux herbicides (2,4-D, 2,4,5-TP, alachlore, dicamba, paraquat), les insecticides organophosphorés (diazinon et malathion), les insecticides carbamates (carbofuran) ou les fongicides (chlorothalonil, manèbe/mancozèbe et bénomyl) augmentent le risque d'hypothyroïdie.^{498, 506} Les fongicides (manèbe/mancozèbe) ont également été associés à l'hyperthyroïdie. Les femmes qui avaient épousé un agriculteur, qui utilisait des pesticides à titre professionnel, étaient plus susceptibles de souffrir de maladies liées à l'hypothyroïdie que la population générale. L'exposition à certains pesticides tels que les insecticides organochlorés endommage également la glande thyroïde chez d'autres animaux.

De nombreuses autres catégories de molécules peuvent endommager la thyroïde, comme les composés halogénés, notamment les biphényles polychlorés, les dioxines et les furanes.⁵⁰⁶ Aux États-Unis, les maladies thyroïdiennes sont enregistrées chez 7,5% de la population (plus fréquentes chez les femmes), ce qui est probablement une sous-estimation, car les cas moins graves ne sont pas enregistrés ; au Brésil, les maladies thyroïdiennes sont enregistrées chez 5,4% de la population.⁴⁹⁸ Selon certaines estimations, 5 à 9% de la population présentent des

problèmes thyroïdiens subcliniques, c'est-à-dire peu évidents, tandis qu'entre 0,8 et 7,5% présentent des problèmes évidents et nécessitent donc un traitement. ⁵⁰⁶

LES ALTÉRATIONS DE LA FERTILITÉ MASCULINE

Les perturbateurs endocriniens sont liés à la fréquence accrue de maladies émergentes telles que celles du système reproducteur masculin. ^{459, 460} La qualité du sperme peut être altérée par les pesticides (par exemple, les organo-phosphorates) de plusieurs façons : réduction de la densité, réduction du nombre de spermatozoïdes, inhibition de la spermatogenèse, augmentation des anomalies de l'ADN, modification des niveaux de testostérone et des hormones hypophysaires. Certains effets indésirables sont une augmentation des fausses couches, une modification du rapport homme/femme et une démasculinisation (aldrine, atrazine, chlordane, DDT, dieldrine, endosulfan et vinclozoline). ⁵⁰⁰ On sait depuis plus de 70 ans que le DDT administré aux coqs provoque une atrophie testiculaire et une féminisation. ³⁰⁸ Chez les hommes vivant aux États-Unis et en Europe, le nombre de spermatozoïdes a diminué de 50% entre 1938 et 1990. ⁵⁰² En France, entre 1989 et 2005, la concentration de spermatozoïdes chez les hommes de 35 ans a diminué de 32%. ⁴⁶¹ D'autres études montrent également une diminution de la qualité des spermatozoïdes, ce qui peut suggérer une augmentation de la demande de procréation assistée. ⁴⁶² En général, en Europe et aux États-Unis, on estime que la réduction du nombre de spermatozoïdes peut atteindre 2% par an. ⁵⁰²

Le dibromochloropropane (1,2-Dibromo-3-Chloropropane ou DBCP) est un pesticide utilisé contre les vers (nématodes), qui sont des parasites des cultures tropicales telles que l'ananas, la canne à sucre et les bananes (il a été utilisé dans le sol comme fumigant en quantités de 10-120 kg/ha ou dans l'eau d'irrigation). ⁵⁵⁴ Il faut rappeler que les nématodes présents dans le sol sont très importants et contribuent à la minéralisation de l'azote, c'est-à-dire qu'ils aident les plantes à se nourrir. Le dibromochloropropane a été autorisé comme fumigant aux États-Unis en 1964, alors que les effets négatifs sur les testicules des rongeurs testés en laboratoire étaient déjà connus en 1961 (par exemple, la réduction du nombre de spermatozoïdes). ⁵⁵⁴ En 1977, les mêmes effets chez les rongeurs ont été enregistrés chez les ouvriers de l'usine produisant ce nématicide : ils ne pouvaient pas avoir d'enfants (en raison d'oligospermie ou d'azoospermie). En 1990, des dizaines de milliers de travailleurs agricoles ont signalé des dommages à leur système reproductif et à leur capacité de procréer. Aux États-Unis, l'utilisation du dibromochloropropane a été arrêtée (en 1979) mais pas sa production. Les industries ont donc continué à vendre le nématicide dans les pays tropicaux où il était le plus utilisé. On sait également (depuis 1975) qu'il est cancérigène et qu'il est persistant dans le sol pendant au moins 2 ans. ^{555, 556} En Amérique du Nord, 20 ans après l'interdiction de l'utilisation de cette substance, on la trouve encore dans l'eau potable (dans 38 villes de Californie). ⁵⁵⁴ Cette histoire, comme tant d'autres concernant l'utilisation de produits chimiques dangereux, devrait nous aider à comprendre l'importance d'appliquer le principe de précaution, au moins après les premiers résultats scientifiques ou médicaux.

En conclusion, de nombreux signes indiquent que la fécondité est en baisse en Europe et aux États-Unis. Par exemple, aux États-Unis, entre 1976 et 1998, le nombre de femmes sans enfant (âgées de 35 à 39 ans) a doublé (de 10,5% à 19,8%), le nombre de consultations médicales pour infertilité masculine a augmenté et les grossesses chez les jeunes femmes ont diminué. L'exposition aux pesticides peut nuire à la qualité du sperme masculin. La présence d'herbicides (alachlore, atrazine, métolachlore) et d'insecticides (diazinon) dans l'urine a été associée à des cas de diminution de la qualité du sperme. ¹²⁵¹ Ils sont probablement l'un des facteurs responsables de la réduction de la fertilité masculine. La fertilité féminine et le développement embryonnaire peuvent également être affectés par l'exposition à certaines

substances dangereuses (par exemple, le diéthylstilbestrol, le phtalate).¹²⁵¹ Les phtalates peuvent être trouvés chez les enfants à des concentrations élevées : supérieures à celles mesurées dans l'urine des mères.¹²⁵⁵

L'exposition environnementale à des molécules fabriquées par l'homme peut favoriser une baisse de la fertilité. La connaissance est incomplète, mais les soupçons devraient être suffisants, étant donné que nous avons affaire à des mécanismes de sauvegarde qui sont fondamentaux pour la survie.

Si la pollution diffuse par les perturbateurs endocriniens se poursuit, au rythme actuel de la baisse de la fécondité, le seuil d'infécondité sera atteint pour une partie de la population d'ici quelques décennies. Cette hypothèse est tout à fait raisonnable.

UN SAVOIR SOUS-ÉVALUÉ

Les problèmes générés par les perturbateurs endocriniens, tels que certaines matières actives des pesticides et les adjuvants qui entrent dans la formulation commerciale, sont connus depuis longtemps : pour certaines molécules depuis les années 1990. Malheureusement, ces connaissances, qui dans certains cas ont été confirmées par des événements indésirables (maladies chez les agriculteurs ou les producteurs de pesticides) et des études épidémiologiques, n'ont pas conduit à l'application de mesures préventives appropriées. La littérature scientifique sur l'équilibre délicat des hormones est importante et suffit à nous alarmer au point de nous inciter à adopter des stratégies différentes de celles appliquées jusqu'à présent. Les connaissances et les preuves fournies par l'enregistrement des maladies ne sont que la partie émergée de l'*iceberg*. Nous sommes exposés, avant même notre naissance et tout au long de notre vie, à des mélanges variables de milliers de composés chimiques fabriqués par l'homme, à des doses qui sont considérées à tort comme sûres parce que des critères politiques et économiques, plutôt que sanitaires et environnementaux, sont appliqués. Les effets additifs, synergiques et à long terme d'un nombre infini de combinaisons possibles sont encore largement inconnus. Nous nous soumettons donc, ainsi que la biosphère, à une expérience inquiétante. Certains des résultats rapportés dans la littérature scientifique sont résumés ci-dessous.

- Une enquête menée en France et publiée en 2006 a examiné la présence de pesticides dans l'urine de 546 femmes enceintes. Cinquante-deux molécules de pesticides ont été recherchées (32 organo-phosphates, 12 triazines, 6 amides et 2 carbamates). Seuls 1,6% des échantillons ne présentaient aucune trace de ces 52 molécules, tandis que 54% des échantillons contenaient au moins 8 molécules, 10% des échantillons contenaient au moins 13 pesticides et un échantillon d'urine a été enregistré avec la présence simultanée de 28 pesticides.³¹⁹

- Aux États-Unis, l'urine des enfants et de leurs parents peut contenir de l'atrazine, du chlorpyrifos, du métolachlore et du glyphosate.³²⁰

- En Californie, 35% des femmes enceintes vivant dans des zones rurales présentent des concentrations dangereuses de métabolites d'organophosphates dans leurs urines.¹²⁵⁴

- Des recherches menées aux États-Unis montrent qu'il existe une corrélation entre l'utilisation professionnelle de pesticides et l'augmentation du nombre d'enfants présentant des malformations congénitales (par exemple, un nombre anormal de doigts). Parmi les molécules incriminées figurent certains herbicides (chlorophénoxy comme le 2,4-D ou le MCPA) et fongicides.³²⁹ Certains herbicides sont probablement tératogènes (par exemple, l'herbicide 2,4-D). La tératogenèse (du grec "*génération de monstres*") désigne le développement anormal, pendant la grossesse, de certains organes du fœtus, entraînant la naissance d'un enfant présentant des anomalies congénitales.³³⁰ Dans cette recherche, l'herbicide trifluraline et les fongicides mancozeb, maneb et tributyltin se sont avérés être des perturbateurs endocriniens.³²⁹ Depuis les

années 1990, plusieurs articles scientifiques ont fait état d'un lien entre l'exposition aux pesticides et l'augmentation du nombre de bébés nés avec des malformations.^{331, 332}

- Une étude publiée en 2004 confirme que l'exposition à l'aldrine et au lindane prédit une probabilité accrue d'avoir un cancer du sein.³²⁵

- Les insecticides néonicotinoïdes (acétamipride, clothianidine, thiaclopride, imidaclopride, thiaméthoxam et dinotéfurane) font partie des pesticides les plus utilisés dans le monde : au moins 24% du marché mondial en 2014. Des études ont montré que les néonicotinoïdes réduisent la population d'insectes et d'oiseaux insectivores, mais ils peuvent également être toxiques pour les mammifères, avec des effets sur la reproduction, le foie, le système nerveux et sont génotoxiques.^{433, 1249} Ils peuvent endommager les neurones, le cerveau et les fonctions associées telles que la mémoire et l'apprentissage.¹²⁵⁰ Des études en laboratoire (in vitro) ont montré des effets néfastes sur le sperme des mammifères et des altérations du développement embryonnaire, de sorte qu'ils pourraient également avoir des effets néfastes sur la reproduction chez l'homme. Certaines études laissent donc supposer que ces molécules sont très dangereuses pour les mammifères comme nous. Malheureusement, les néonicotinoïdes pénètrent dans notre corps et peuvent être mesurés dans l'urine. Dans la population japonaise, de 1991 à 2011, la concentration de néonicotinoïdes dans les urines a augmenté : plus de 65% des échantillons étaient positifs pour l'imidaclopride.¹²⁴⁹ Les néonicotinoïdes sont également présents dans l'urine de la population sri-lankaise (à des concentrations comprises entre 0,086 et 2,6 ng/mL), dans l'urine de volontaires espagnols et dans 100% de la population chinoise vivant dans des zones rurales et 95% de la population chinoise vivant dans des zones urbaines (un total de 295 échantillons d'urine a été analysé).¹²⁴⁹ La Chine est à la fois un producteur et un utilisateur de néonicotinoïdes. La recherche de 6 néonicotinoïdes (acétamipride, clothianidine, thiaclopride, imidaclopride, thiaméthoxame et dinotéfurane) dans 324 échantillons d'urine provenant de la population générale vivant dans 13 villes chinoises différentes a donné de nombreux résultats alarmants :¹²⁴⁹

- Tous les échantillons d'urine contenaient des néonicotinoïdes : clothianidine (99%), thiaméthoxam (98%), imidaclopride (97%), dinotéfurane (96%), acétamipride (96%), thiaclopride (92%).
- La clothianidine est trouvée à la concentration la plus élevée (médiane) de 0,24 ng/mL (et à la concentration la plus élevée de 17 ng/mL).
- Le dinotéfurane est le principe actif mesuré avec la concentration la plus élevée : 18 ng/mL.
- Les hommes ont des concentrations totales plus élevées.

Ces résultats démontrent un niveau élevé d'exposition de la population urbaine chinoise à des molécules dangereuses qui se retrouvent malheureusement aussi dans l'urine des enfants. Les organophosphorés, à des concentrations plus élevées que celles des néonicotinoïdes, et les métabolites des pyréthroïdes peuvent également être mesurés dans les urines.

Un aspect qui devrait être très préoccupant est que l'on ne sait pas grand-chose des transformations que les néonicotinoïdes subissent dans notre corps. Les métabolites peuvent être beaucoup plus toxiques que les substances de départ (on sait que le thiaméthoxame est transformé en clothianidine par des insectes comme les larves de *Spodoptera frugiperda*, les souris et des plantes comme le riz et le coton). Le complexe enzymatique du cytochrome P450 (également présent chez l'homme) peut transformer le thiaméthoxame en clothianidine. Malheureusement, les connaissances sont insuffisantes pour considérer ces niveaux d'exposition, qui surviennent au début du développement, comme non dangereux. Les effets synergiques, additifs et sublétaux sont difficiles à détecter avec les informations disponibles avant le commerce mais pourraient réserver de nombreuses mauvaises surprises. Il convient de remarquer à nouveau qu'il est possible qu'il existe une corrélation positive entre la détection de

pesticides dans l'urine et certains problèmes de reproduction (par exemple, une réduction du nombre de spermatozoïdes).¹²⁵¹

- L'imidaclopride a été autorisé au Japon en 1992 et aux Etats-Unis en 1994. Depuis, les néonicotinoïdes ont été autorisés dans plus de 120 pays. Au Japon, l'utilisation des néonicotinoïdes a également été encouragée par l'émergence d'insectes résistants aux insecticides organophosphorés et aux pyréthroïdes. En raison de leur utilisation généralisée, les pesticides pénètrent dans nos assiettes par les aliments et l'eau. Malheureusement, les insecticides ou leurs métabolites (néonicotinoïdes, organophosphorés et pyréthroïdes) sont nocifs pour notre santé. L'exposition aux organophosphorés favorise les effets neurotoxiques (retard mental, *déficit* d'attention et baisse du QI), et l'exposition aux pyréthroïdes est associée au cancer (leucémie pédiatrique).¹²⁵² Malheureusement, ces insecticides ont été retrouvés dans l'urine de 703 enfants japonais de trois ans : 58% ont enregistré des néonicotinoïdes, 90% des organo-phosphorés et 92% des pyréthroïdes.¹²⁵² Les concentrations les plus élevées d'organophosphorés étaient associées à la consommation de fruits et à l'utilisation professionnelle de pesticides par les membres de la famille. La plupart des enfants japonais examinés avaient des traces des substances dangereuses recherchées dans leur urine, ce qui confirme une exposition dangereuse.

- Des concentrations dangereuses de plusieurs pesticides peuvent être trouvées dans la population italienne non professionnellement exposée. Les insecticides organophosphorés peuvent être transformés en plusieurs métabolites qui se retrouvent dans l'urine [diméthylphosphate (DMP), diméthylthiophosphate (DMTP), diméthylthiophosphate (DMDTP), diéthylphosphate (DEP), diéthylthiophosphate (DETP) et diéthylthiophosphate (DEDTP), méthamidophos (METH qui est également dérivé de l'acéphate), 3,5,6-Trichloro-2-pyridinol (TCP, dérivé du chlorpyrifos et du chlorpyrifos-méthyl)]. La demi-vie dans notre organisme après exposition cutanée et ingestion peut être assez longue : 27 jours pour le TCA dérivé du chlorpyrifos et du chlorpyrifos-méthyl.¹²⁵⁶ Un métabolite des fongicides (éthylenthionure dérivée de l'éthylène-bisdithiocarbamate) qui peut être mesuré dans l'urine altère la fonction thyroïdienne. Certains métabolites des insecticides pyréthroïdes (perméthrine, cyperméthrine, deltaméthrine et fenvalerate) peuvent également être mesurés dans les urines. Ainsi, les carbamates, les organophosphorés et les pyréthroïdes peuvent être déterminés comme métabolites dans l'urine. Une étude menée en Italie a recherché ces molécules dans l'urine de personnes non exposées professionnellement et vivant à Florence ou à Ragusa. Sur 69 échantillons d'urine, un seul s'est révélé sans les 10 métabolites recherchés, 50% des sujets ont enregistré au moins 6 molécules différentes et un échantillon en contenait 9.¹²⁵⁶ Ces résultats confirment qu'à travers l'alimentation, on peut être exposé à des substances dangereuses qui sont transformées et ensuite éliminées dans l'urine.

- En Italie, parmi les femmes enceintes vivant à Rome, le glyphosate est retrouvé dans les urines à des concentrations comprises entre 0,43 ng/mL et 3,48 ng/mL.⁵⁰⁰ Cet herbicide agit également comme un perturbateur endocrinien (profil anti-œstrogène) et a des effets négatifs sur la reproduction (par exemple sur la production de sperme et la grossesse).⁴⁹² Les effets endocriniens sont enregistrés à des concentrations 800 fois inférieures à celles autorisées dans certaines denrées alimentaires ou certains aliments pour animaux (par exemple ceux issus de plantes génétiquement modifiées pour résister à l'herbicide, où il restera donc à des concentrations élevées), et à des concentrations au moins 10 fois inférieures à celles qui provoquent les premiers effets toxiques aigus évidents.⁴⁹² Les études de toxicité menées sur des lignées de cellules hépatiques humaines font état d'effets synergiques générés par les autres substances contenues dans le produit commercial glyphosate. Les adjuvants présents dans la formulation des herbicides commerciaux peuvent augmenter la toxicité et être plus dangereux, dans certains cas, que l'ingrédient actif lui-même. Ces résultats soulignent l'importance de tester

l'ensemble du produit commercial, car les molécules adjuvantes peuvent être aussi dangereuses, voire plus, et peuvent renforcer les effets indésirables de l'ingrédient actif.

Nous sommes exposés à des dizaines de milliers de molécules chimiques différentes, et en supposant que seules quelques centaines ont des effets endocriniens, les effets additifs ou multiplicatifs de millions de combinaisons possibles sont imprévisibles. Certains des effets néfastes tels que ceux sur la reproduction (par exemple, les anomalies congénitales) et la stérilité, tant chez les femmes que chez les hommes, ont été associés à l'exposition à certains pesticides appartenant à toutes les catégories largement utilisées : organochlorés, organophosphorés et pyréthroïdes.⁴⁹¹ Les effets néfastes des pesticides (et autres) sur la reproduction et le développement sont particulièrement risqués car ils se manifestent dans les générations suivantes. C'est une raison de plus pour agir : les principes éthiques et moraux doivent nous inciter à agir.⁵⁷¹

On trouve ci-dessous une liste non exhaustive de certains pesticides pour lesquels des effets de perturbation endocrinienne ont été documentés.⁴⁶⁴

Interférer avec l'activité des androgènes	Interférer avec l'activité des œstrogènes	Modification de l'activité de l'aromatase	Interférences avec la thyroïde
2,4-D (E), Aldrine (I), Atrazine (E), Bitertanol (F), Chlorothalonil (F), Chlordane (I), Chlorpyrifos méthyle (I), Cyproconazole (F), DDT et métabolites (I), Dichlorvos (I), Dicofol (I), Dieldrine (I), Endosulfan (I), Fenarimol (F), Fenitrothion (I), Lindane (I), Heptachlore (I), Hexaconazole (F), Méthiocarbe (E), Myclobutanil (F), Penconazole (F), Procymidone (F), Propiconazole (F), Tébuconazole (F), Vinclozoline (F)	Acetochlor (E), Alachlor (E), Aldicarb (I), Bendiocarb (I), Benomyl (F), Bitertanol (F), Captan (F), Carbaryl (I), Carbendazim (F), Chlordane (I), Chlorfenviphos (I), Cyperméthrin (I), Cyproconazole (F), DDT et ses métabolites (I), Deltaméthrin (I), Diazinon (I), Dicofol (I), Dieldrine (I), Endosulfan (I), Fenitrothion (I), Glyphosphate (E), Heptachlore (I), Hexaconazole (F), Methiocarb (E), Methomyl (I), Myclobutanil (F), Penconazole (F), Perméthrine (I), Propiconazole (F), Tebuconazole (F).	Atrazine (E), Benomyl (F), Bitertanol (F), Carbendazim (F), Cyproconazole (F), Endosulfan (I), Fenarimol (F), Glyphosphate (E), Hexaconazole (F), Methomyl (I), Myclobutanil (F), Penconazole (F), Propiconazole (F), Tebuconazole (F)	Acétochlore (E), Diméthoate (I), Fenbuconazole (F), Lindane (I), Malathion (I), Trichlorfon (I)
Modification de la production de mélatonine	Modification de la production d'hormones gonadotropes	Interférer avec l'activité des catécholamines	Interférer avec l'activité de l'insuline
Parathion (I)	Parathion (I)	Malathion (I), Parathion (I)	Diméthoate (I), Lindane (I)
Interférer avec l'hypothalamus	Interférents de l'activité de la progestérone		
Acéphate (I), Atrazine (E)	Alachlore (E), Aldicarbe (I)		

Légende : E = herbicide ; F = fongicide ; I = insecticide.

MIEL ET PESTICIDES

Au moins 1.100 pesticides (insecticides, acaricides, rodenticides, fongicides et herbicides) sont commercialisés en Europe. Ces substances sont principalement utilisées dans la production alimentaire et contaminent l'environnement. Les aliments contaminés comprennent le miel, qui peut contenir plusieurs molécules à la fois. La consommation journalière potentielle de miel (0,8 g par kilogramme de poids corporel par jour : pour un adulte de 60 kg, cela signifie consommer 48 g de miel par jour) présente des risques pour la santé. Une étude bibliographique des pesticides retrouvés dans 2.620 échantillons de miel du monde entier rapporte que 52 insecticides différents peuvent être enregistrés, dont 19 appartiennent à la catégorie des organophosphorés (par exemple coumaphos, parathion, parathion-éthyle, phorate, chlorfenvinphos, chlorpyrifos, diméthoate, dichlorvos, diazinon, malathion), 13 aux organochlorés (par exemple p,p' DDT, 4,4-DDE, p,p' DDE, p,p' DDD, heptachlore, metheldrine, méthoxychlore, lindane, heptachlore, méthoxychlore, lindrine, dichlorvos, diazinon, malathion), 7 aux néonicotinoïdes (par exemple : acétamipride, clothianidine, imidaclopride, nitenpyram, thiaclopride et thiaméthoxam), 6 aux pyréthroides (par exemple : cyperméthrine et perméthrine), 5 aux carbamates (par exemple : aldicarbe, carbofuran, carbaryl et pirimicarbe).¹²²⁰ Par conséquent, à travers la consommation de miel, nous pouvons consommer des substances classées comme dangereuses pour la santé : aldicarbe, coumaphos, parathion, parathion-éthyle, carbofuran, azinphosméthyle et dichlorvos. Dans le miel, certaines de ces molécules peuvent être trouvées à des concentrations dangereuses, comme le parathion (enregistré, par exemple, dans des miels français, italiens et portugais) et le carbofuran (enregistré à des concentrations dangereuses en France et au Portugal).¹²²⁰ Des résidus d'acaricides utilisés par les apiculteurs peuvent également être trouvés dans le miel. Dans certains cas, ces résidus se trouvent à des concentrations élevées, par exemple l'amitraz, le phosmet et le monocrotophos. Des résidus de 19 fongicides et de 12 herbicides peuvent également être trouvés dans le miel.

Il est connu que les pesticides peuvent altérer la capacité de reproduction chez l'homme en affectant négativement la qualité du sperme. Par exemple, les insecticides organophosphorés ont été associés à une réduction de la motilité, du volume et du nombre de spermatozoïdes (chez des travailleurs exposés professionnellement dans des usines de pesticides).¹²²⁰ On a également signalé que l'exposition professionnelle (agriculteurs) au glyphosate réduisait la qualité du sperme. D'autres molécules suspectées de diminuer la qualité du sperme sont les organochlorés et les pyréthroides. Les organophosphorés et les carbamates peuvent altérer la production de testostérone. Dans les études animales, certains organochlorés peuvent inhiber la biosynthèse de la testostérone.

L'exposition professionnelle aux pesticides augmente également la probabilité de problèmes d'infertilité chez les femmes (par exemple, l'exposition à l'acide 2,4-dichlorophénoxy acétique chez les femmes au Canada). Les insecticides organochlorés sont soupçonnés d'augmenter la production de certaines hormones (telles que l'hormone folliculo-stimulante et l'hormone leutinisante).

Certains de ces effets sont très évidents dans des modèles animaux tels que les souris. Par exemple, les pesticides qui, en laboratoire, interfèrent avec la biosynthèse de la testostérone (chez les souris et les rats) sont : l'acétamipride, le chlorpyrifos, la cyperméthrine, le diazinon, la perméthrine, le diméthoate, l'endosulfan, l'esfenvalerate et le glyphosate.¹²²⁰ Dans le modèle expérimental du rat, le nombre et la motilité des spermatozoïdes sont réduits par : la cyperméthrine, l'amitraz, le carbaryl, le carbendazim, le carbofuran, le chlorpyrifos, le diazinon, le diméthoate, l'endosulfan, le fenvalerate et le glyphosate. Des études menées sur des rats montrent que les résidus de pesticides peuvent induire des lésions testiculaires en altérant les mitochondries (acétamipride, clothianidine, cyperméthrine, carbendazime et glyphosate).

Malheureusement, ces molécules sont contenues dans le miel, les aliments végétaux et, dans certains cas, contaminent l'eau et même d'autres aliments (par exemple, les organochlorés bioaccumulés dans les sous-produits animaux). Ainsi, la consommation de miel contaminé peut également contribuer à des problèmes de reproduction chez les animaux, y compris les humains.

LES EFFETS NEUROTOXIQUES DES PESTICIDES

De nombreuses substances actives utilisées pour contrôler des animaux tels que les insectes agissent sur des mécanismes fondamentaux et omniprésents dans le système nerveux. Il n'est donc pas surprenant que ces molécules soient capables d'exercer des effets indésirables qui peuvent survenir chez tous les animaux dont les fonctions dépendantes du système nerveux sont altérées. Les effets neurotoxiques peuvent être très graves, notamment après une exposition du fœtus (par exemple aux insecticides).

Les effets néfastes sur le système nerveux peuvent être très divers et dépendent de nombreux facteurs tels que les doses, la durée d'exposition et le mode de contamination. Certains symptômes de gravité intermédiaire associés à l'exposition aux organophosphorés sont les maux de tête, les nausées, les vomissements et la constriction des pupilles. En cas d'intoxication grave, des bronchospasmes, des modifications du rythme cardiaque, des douleurs musculaires, des crampes, une paralysie des muscles des jambes, une altération des capacités sensorielles et des convulsions peuvent être signalés.¹²⁵⁴ Certains symptômes peuvent également apparaître plusieurs années après l'exposition. Les effets possibles à long terme sont la dépression, la maladie de Parkinson (organophosphates, glyphosate, paraquat, dieldrine, diaquat, roténone, manèbe et éthylène bis-dithiocarbamates) et les déficits des fonctions cognitives.¹²⁵⁴

Les produits chimiques tels que les pesticides ne sont pas testés pour leurs effets neurotoxiques pendant leur développement avant d'être commercialisés, car ils sont considérés comme sûrs jusqu'à preuve du contraire. Il est très difficile d'étudier les effets neurotoxiques des molécules en les évaluant individuellement, surtout si leurs effets sont faibles (par exemple, réduction du QI de quelques points et donc baisse de l'intelligence). Il est encore plus difficile d'étudier les effets synergiques et additifs de dizaines de molécules comme les pesticides neurotoxiques auxquels nous sommes exposés quotidiennement.

Les insecticides organochlorés sont des molécules persistantes et bioaccumulables dans la chaîne alimentaire. En raison de l'utilisation répandue de ces molécules, leurs effets neurotoxiques peuvent survenir à un stade précoce du développement. Au Japon, 21 molécules de composés organochlorés sont retrouvées dans le sérum des femmes enceintes (certaines se retrouvent également dans le tissu adipeux et le cordon ombilical). Il a été démontré que l'exposition des mères (non exposées professionnellement) aux organochlorés (par exemple l'époxyde de cis-heptachlore ou le p,p'-DDE) provoque des effets neurotoxiques mesurables chez leurs enfants dès l'âge de 18 mois (réduction du développement mental et psychomoteur).¹¹⁵⁸

Au moins 200 molécules (polluants environnementaux) ont été identifiées comme générant des effets neurotoxiques, dont de nombreux pesticides. La présence de pesticides organochlorés dans le lait maternel (par exemple le DDT et ses dérivés) est probablement associée à des problèmes de développement neurologique chez les nourrissons exposés pendant l'allaitement (une association a été trouvée entre l'exposition aux insecticides organochlorés par le lait maternel et la concentration des hormones thyroïdiennes et de croissance chez les nourrissons).¹¹⁶³ L'exposition des nourrissons peut être plus élevée que celle des mères en raison de la bioconcentration dans le lait maternel. Les polychlorobiphényles s'accumulent dans les tissus adipeux par le biais du lait maternel peuvent entraîner une exposition des nourrissons 100 fois supérieure (calculée sur la base du poids corporel).³²⁷

Les mères résidant à proximité de champs agricoles où des pesticides sont utilisés augmentent la probabilité d'enregistrer des problèmes de développement neurologique chez leurs enfants. ¹¹⁶² Chez les enfants de 7 ans, l'incidence des problèmes cognitifs (par exemple, réduction du QI, de la compréhension verbale, de la capacité de mémoire) augmente si les mères ont été exposées (non professionnellement mais en tant que résidentes dans un rayon de 1 km de champs traités pendant la grossesse) à des pesticides neurotoxiques (par exemple, organophosphorés, pyréthroïdes, néonicotinoïdes et fongicides à base de manganèse). ¹¹⁶² L'exposition des mères à certains pesticides (par exemple les pyréthroïdes et les organo-phosphorés) a également été liée à une probabilité accrue d'enregistrer des anomalies congénitales chez les nouveau-nés. ¹¹⁶²

Des dizaines de molécules classées comme organophosphorées sont homologuées pour un usage agricole (une quarantaine aux États-Unis) et figurent parmi les pesticides les plus vendus dans le monde. En Californie, il a été constaté que 40% des enfants travaillant dans l'agriculture présentent des signes d'empoisonnement aux organophosphates et aux carbamates (faibles niveaux de cholinestérase dans le sang). ⁵⁰² L'exposition pendant la grossesse à certains pesticides, tels que les insecticides organophosphorés (mesurés dans l'urine des femmes), peut réduire l'intelligence des enfants dès l'âge de 7 ans. ⁵¹³ Dans l'urine d'enfants âgés de 8 à 15 ans, la détection d'insecticides organophosphorés (et de leurs métabolites) a été associée à une probabilité accrue d'enregistrer des *déficits* d'attention et une hyperactivité. ⁵¹⁴ Aux États-Unis, 94% des urines d'enfants (1.139 sujets) enregistrent la présence d'au moins un organophosphate ou de son métabolite. ⁵¹⁴ L'exposition est donc systématique et commence dès les premiers stades du développement. La fréquence des troubles de l'attention avec hyperactivité était proportionnelle aux concentrations d'insecticides trouvées dans l'urine.

Dans la population âgée d'Américains d'origine mexicaine vivant en Californie, l'association possible entre l'exposition aux insecticides organophosphorés, parce qu'ils vivent près de champs traités, et le déclin cognitif et la mortalité a été mise en évidence. ¹¹⁵⁹ L'exposition prolongée à de faibles concentrations d'insecticides organophosphorés génère des effets sublétaux, mesurables chez les personnes âgées avec une réduction des capacités cognitives. Des effets neurotoxiques ont également été mis en évidence après une intoxication aiguë, c'est-à-dire à des doses plus élevées. ¹¹⁵⁹ Ces effets peuvent être mesurés plus fréquemment chez les personnes exposées professionnellement ou parce qu'elles vivent à proximité des champs traités (moins de 500 m) car elles enregistrent des concentrations élevées de ces molécules dans leurs urines. Les insecticides organophosphorés (ils inhibent l'enzyme acétylcholinestérase) sont utilisés en grande quantité (au moment de la publication de cette étude, ils représentaient 35% de l'ensemble des insecticides distribués aux États-Unis) et auraient, outre des problèmes au niveau du système nerveux central, d'autres effets négatifs tels que ceux sur les mitochondries et des effets neuro-inflammatoires (ils provoquent une réduction de la concentration de l'hormone adiponectine, liée au diabète de type 2 et à d'autres problèmes de santé). ¹¹⁵⁹ L'exposition à des doses plus élevées d'organophosphates, par exemple chez les personnes qui utilisent ces molécules pour des raisons professionnelles, a entraîné des problèmes de mémoire, une réduction de la capacité d'attention, une dépression de l'humeur et des *déficits* cognitifs.

Au moins 90 pesticides sont toxiques pour le cerveau et, chez les enfants, ils sont probablement liés à une augmentation des troubles de l'attention et de l'hyperactivité (par exemple, les organophosphorés, comme le chlorpyrifos et les pyréthroïdes). ^{326, 327, 491, 513}

Le processus de formation et de développement du système nerveux est très vulnérable aux produits chimiques. Des études montrent que des concentrations de glyphosate, similaires à celles tolérées dans l'eau potable, peuvent altérer le développement du système nerveux (0,1 µg/L en Europe et 700 µg/L aux États-Unis). ¹²⁷⁴ Le glyphosate est capable de traverser la barrière hémato-encéphalique et a été associé à la maladie de Parkinson, aux troubles du comportement, à l'autisme et à l'anxiété. En laboratoire, il a été signalé qu'il affecte l'expression des gènes dans les cellules nerveuses (il inhibe la production de certaines tubulines et protéines

cytochromes qui sont importantes dans les processus de détoxification).¹²⁷⁴ De nombreuses études confirment que les seuils de sécurité établis par les évaluations des risques avant commercialisation ne sont pas en mesure d'assurer la protection de notre santé.

L'exposition chronique aux pesticides a été associée à des anomalies neurocomportementales telles que l'anxiété, la dépression, des *déficits* de la mémoire à court terme, de l'apprentissage et de l'attention.^{500, 516, 522} Ces anomalies peuvent être causées par des déséquilibres dans les canaux ioniques importants pour la neurotransmission (aldrine, chlordane, hexachlorobenzène, DDT, DDE, pyréthroïdes), des dommages aux fonctions mitochondriales ou l'inhibition d'enzymes (par exemple, l'acétylcholinestérase).⁵⁰⁰ Ainsi, les effets neurotoxiques sont la conséquence des mécanismes d'action primaires des ingrédients actifs, qui sont connus et sont les mécanismes souhaités car ils sont nécessaires pour générer la mort des insectes. Là encore, nous trouvons des analogies avec les problèmes que posent les pesticides dans le monde des insectes. Des effets sublétaux peuvent se produire en raison des altérations induites dans le système nerveux et générer des conséquences dévastatrices à long terme, tant chez l'homme que chez l'abeille. Les mécanismes de base des cellules sont identiques, les neurotransmetteurs, leurs récepteurs, les enzymes, les mécanismes de fonctionnement des neurones, les canaux ioniques sont très similaires et omniprésents dans le règne animal. Il n'est donc pas surprenant que certains des symptômes générés par des doses sublétales chez les insectes soient très similaires à ceux enregistrés chez l'homme.

Le trouble *déficitaire de l'attention avec hyperactivité* (TDAH) est un trouble du développement neurologique caractérisé par une difficulté à maintenir l'attention, une activité excessive et/ou une difficulté à contrôler son propre comportement (impulsivité) qui ne semble pas approprié pour l'âge de la personne : environ 4% de la population d'âge scolaire souffre de TDAH et il est plus fréquent chez les garçons. En Italie, au moins 1% des enfants âgés de 6 à 18 ans présentent ce trouble.^{512, 539, 540} Les personnes atteintes du trouble déficitaire de l'attention avec hyperactivité (TDAH) peuvent également connaître d'autres problèmes de santé tels que des troubles du sommeil et de l'anxiété.⁵⁴⁰

L'exposition des mères, au cours du deuxième ou du troisième trimestre de la grossesse, à certains pesticides (organophosphorés comme le chlorpyrifos, néonicotinoïdes comme l'imidaclopride et pyréthroïdes) a été associée à une probabilité accrue d'enregistrer l'autisme.⁴⁹¹ Plusieurs études révèlent que les substances nocives peuvent favoriser l'autisme, l'hyperactivité, la dyslexie et les problèmes d'apprentissage chez les enfants ; il est probable que jusqu'à un enfant sur six souffre de ces troubles, et qu'au moins 3% des malades sont dus à l'exposition aux polluants.^{326, 327} Des pesticides (chlorpyrifos, DDT/DDE) et d'autres substances (plomb, méthylmercure, biphényles polychlorés, arsenic, toluène, éthers diphényliques polybromés, phtalates et bisphénol A) ont été identifiés comme coupables. Une étude menée en Californie a enregistré l'association entre la manifestation de l'autisme et l'exposition prénatale aux molécules suivantes (mères vivant à moins de 2 km de champs traités) : chlorpyrifos, diazinon, glyphosate, malathion, bromure de méthyle, myclobutanil, perméthrine.¹¹⁶¹ L'exposition au cours de la première année de vie aggrave les choses en favorisant les déficiences intellectuelles. Par conséquent, pour espérer diminuer l'incidence de ces troubles du développement du système nerveux central, il faut réduire l'exposition environnementale des mères et de la première année de vie. Les molécules utilisées dans les champs se retrouvent dans la poussière de la maison, dans le corps des mères et dans l'air des habitants situés à moins de 1.250 m des champs traités (en Californie).¹¹⁶¹

Certaines maladies neurodégénératives telles que la maladie de Parkinson, la maladie d'Alzheimer et la sclérose latérale amyotrophique ont été associées à une exposition chronique à certaines substances telles que le paraquat, le manèbe, la diédrine, les organo-phosphorés et les pyréthroïdes.^{518, 519} Les travailleurs exposés aux organophosphorés et aux insecticides

organochlorés, ou aux fumigants et aux défoliants, étaient plus susceptibles d'être atteints de la maladie d'Alzheimer.⁴⁹¹

La maladie de Parkinson est une affection neurodégénérative à évolution lente mais progressive qui affecte principalement certaines fonctions telles que le contrôle des mouvements et l'équilibre. Cette maladie fait partie d'un groupe de maladies connues sous le nom de "*troubles du mouvement*", dont la maladie de Parkinson est la plus courante. Avant l'âge de 20 ans, c'est extrêmement rare. Au-delà de 60 ans, elle touche 1 ou 2% de la population, tandis que le pourcentage passe à 3-5% lorsque l'âge dépasse 85 ans.⁵⁴⁴ La prévalence de la maladie dans les pays industrialisés est d'environ 0,3%.⁵⁴⁶ Les structures impliquées dans la maladie de Parkinson sont situées dans des zones profondes du cerveau. La maladie se manifeste lorsque la production de dopamine dans le cerveau diminue considérablement. Le risque de la maladie augmente avec l'exposition à des substances telles que certains pesticides (par exemple, le paraquat), les solvants à base d'hydrocarbures (par exemple, le trichloréthylène) et dans certaines professions (comme la soudure) qui exposent les travailleurs à des métaux (fer, zinc, cuivre).⁵⁴⁴ En France, en 2013, la maladie de Parkinson a été reconnue comme une maladie professionnelle, c'est-à-dire résultant d'une exposition à des molécules neurotoxiques (de nombreux agriculteurs allemands ont également vu leur maladie de Parkinson reconnue comme maladie professionnelle).^{500, 1295}

Les principaux symptômes moteurs de la maladie de Parkinson sont le tremblement au repos, la rigidité, la bradykinésie (lenteur des mouvements automatiques) et, à un stade plus avancé, l'instabilité posturale (perte d'équilibre) ; ces symptômes sont asymétriques, un côté du corps étant plus touché que l'autre. Les symptômes non-moteurs les plus fréquemment observés sont : les troubles végétatifs (altération des fonctions des viscères), les troubles de l'odorat, du sommeil et de l'humeur. Les autres symptômes sont la fatigue, la douleur, l'anxiété, la dépression et l'apathie. Avec un traitement approprié, on considère que l'espérance de vie est similaire à celle de la population générale, ou seulement légèrement réduite. Il n'existe pas de remède connu pour la maladie de Parkinson, mais plusieurs traitements permettent de contrôler ses symptômes.⁵⁴⁵ La maladie de Parkinson a été associée à l'exposition aux insecticides (par exemple, les organochlorés tels que le DDT, la dieldrine, l'heptachlore) et aux herbicides.⁵¹⁹ Certains des pesticides qui, dans au moins une étude épidémiologique, sont soupçonnés de contribuer à une probabilité accrue de maladie de Parkinson (par exemple en raison d'un séjour de longue durée à moins de 1.000 m ou 500 m de champs traités) sont les suivants : alachlore, atrazine, chlorpyrifos, diazinon, glyphosate, manèbe, méthomyl, métolachlore, paraquat, propargite, roténone, simazine, zirame, 2,4-D, β -HCH.^{500, 1160}

La sclérose latérale amyotrophique (SLA) est une maladie très grave qui entraîne une paralysie des muscles volontaires et même des muscles respiratoires.⁵⁴³ Les motoneurones reliant le cerveau à la moelle épinière et les motoneurones supérieurs reliant la moelle épinière à tous les muscles du corps sont impliqués dans la maladie. Ces neurones communiquent en envoyant des messages électriques d'un neurone à l'autre jusqu'à ce qu'ils atteignent la cible souhaitée, les muscles. Dans la sclérose latérale amyotrophique, cette ligne de communication neuronale s'effondre ; les neurones moteurs sont incapables de transmettre les informations électriques du cerveau et de la moelle épinière au muscle, qui devient inactif (paralysé). Si un muscle est inactif pendant une longue période, sa masse commence à diminuer, c'est-à-dire qu'il s'atrophie. C'est pourquoi la fonte musculaire est un symptôme courant de la sclérose latérale amyotrophique. Environ la moitié des personnes vivant avec cette maladie peuvent éprouver des difficultés d'apprentissage, d'élocution et de concentration.⁵⁴³ En Italie, il y a environ 6.000 patients enregistrés et l'incidence de cette maladie se situe entre 1,5 et 2,4 cas pour 100.000 habitants ; en Europe, la prévalence est de 4 à 8 cas pour 100.000 habitants. L'espérance de vie après le diagnostic est en moyenne de 3 à 5 ans. L'apparition de cette maladie a également été

associée à l'utilisation de pesticides tels que les insecticides organochlorés (par exemple aldrine, dieldrine, DDT, toxaphène) et les pyréthroides.⁵¹⁸

Il existe au moins 200 substances ayant des effets neurotoxiques bien documentés, mais probablement plus de 1.000 substances qui sont raisonnablement soupçonnées d'avoir des effets neurotoxiques (sur la base d'études expérimentales en laboratoire).^{326, 327} L'absence de confirmation définitive crée un fossé infranchissable, surtout si l'on se fie au mécanisme selon lequel une substance (par exemple un insecticide) ne peut pas être considérée comme dangereuse jusqu'à preuve du contraire. Ces preuves proviennent généralement des décès et des maladies enregistrés lors d'accidents ou d'expositions professionnelles : quand il est trop tard.

On trouve ci-dessous une liste de substances pour lesquelles certaines études scientifiques ont documenté des effets neurotoxiques. ^{326, 327}

SUBSTANCES NEUROTOXIQUES		
Pesticides	Métaux et composés inorganiques	Substances organiques autres que les pesticides
<p>Acetamiprid - Aldicarb - Aldrine - Amitraz - Avermectin - Bensulide - Bromophos - Carbaryl - Carbofuran - Carbophenothion - α-Chloralose - Chlordane - Chlordécone - Chlorfenvinphos - Chlormephos - Chlorpyrifos - Chlorthion - Coumaphos - Cyhalothrine - Cyolane - Cyperméthrine - Deltaméthrine - Déméton - Dialifor - Diazinon - Dichlofenthion - 1,2-Dibromochloropropane³ (DBCP) - Dichlorodiphényltrichloroéthane (DDT) - Acide 2,4-dichlorophénoxyacétique (2,4-D) - 1,3-Dichloropropène - Dichlorvos - Dieldrine - Dimefox - Diméthoate - Dinitrocresol - Dinoseb - Dioxathion - Disulphoton - Edifenphos - Emamectin - Endosulphan - Endothion - Endrin - EPN - Ethiofencarb - Ethion - Ethoprop - Fenitrothion - Fensulphothion - Fenthion - Fenvalerate - Fipronil Fonofos - Formothion - Glyphosate - Heptachlor - Heptenophos - Hexachlorobenzene - Hexaconazole - Imidacloprid - Isobenzan - Isolan - Isoxathion - Leptophos - Lindane - Merphos - Metaldehyde - Methamidophos - Méthidathion - Méthomyl - Bromure de méthyle - Déméton de méthyle - Parathion de méthyle - Mevinphos - Mexacarbate - Mipafos - Mirex - Monocrotophos - Naled - Nicotine - Oxydéméton-...méthyle - Parathion - Pentachlorophénol - Perméthrine - Phorate - Phosphamidon - Phospholan - Propaphos - Propoxur - Pyriminil - Sarin - Schradan - Soman - Sulprophos - 2,4,5-T - Tebupirimfos - Tefluthrin - Terbufos - Thiram - Toxaphène - Trichlorfon - Trichloronat - Trichlorfon - Trichloronate</p>	<p>Composés de l'aluminium - Arsenic et composés de l'arsenic - Composés de l'azide - Composés du baryum - Composés du bismuth - Monoxyde de carbone - Composés du cyanure - Décaborane - Diborane - Éthylmercure - Composés du fluorure - Sulfure d'hydrogène - Plomb et composés du plomb - Composés du lithium - Manganèse et composés du manganèse - Mercure et composés mercuriques - Méthylmercure - Nickel carbonyle - Pentaborane - Phosphine - Phosphore - Composés du sélénium - Composés du tellure - Composés du thallium</p>	<p>SOLVANTS : Acétone - Benzène - Alcool benzylique - Disulfure de carbone - Chloroforme - Chloroprène - Cumène - Cyclohexane - Cyclohexanol - Cyclohexanone - Dibromochloropropane - Acide dichloroacétique - 1,3-Dichloropropène - Diéthylène glycol - N, N-Diméthylformamide - Acétate de 2-éthoxyéthyle - Acétate d'éthyle - Dibromure d'éthylène - Éthylèneglycol - n-Hexane - Isobutyronitrile - Isophorone - Alcool isopropylique - Méthylbutylcétone - Méthylcellosolve - Méthyléthylcétone - Méthylcyclopentane - Chlorure de méthylène - Nitrobenzène - 2-Nitropropane - 1,3-Dichloropropène - Nitrophénol Nitropropane - 1-Pentanol - Bromure de propyle - Pyridine - Styène - Tétrachloroéthane - Tétrachloroéthylène - Toluène - 1, 1,1-Trichloroéthane - Trichloroéthylène - Chlorure de vinyle - Xylène.</p> <p>D'AUTRES SUBSTANCES ORGANIQUES : Acétone cyanohydrine - Acrylamide - Acrylonitrile - Chlorure d'allyle - Aniline - 1,2-Benzènedicarbonitrile - Benzonitrile - Butylated triphenyl phosphate - Caprolactame - Cyclonite - Phtalate de dibutyle - 3-(Diméthylamino)-propanenitrile - Diacrylate de diéthylène glycol - Sulfate de diméthyle - Diméthylhydrazine - Dinitrobenzène - Dinitrotoluène - Ethylbis(2-chloroéthyl)amine - Éthylène - Oxyde d'éthylène - Fluoroacétamide - Acide fluoroacétique - Hexachlorophène - Hydrazine - Hydroquinone - Chlorure de méthyle - Formiate de méthyle - Iodure de méthyle - Méthacrylate de méthyle - p-Nitroaniline - Phénol</p>

PATHOLOGIES RESPIRATOIRES

L'exposition professionnelle aux pesticides augmente la probabilité de souffrir de problèmes respiratoires tels que maux de gorge, toux, asthme et bronchite chronique.⁵¹⁷ Ces maladies sont plus fréquemment signalées chez les personnes qui produisent, transportent, préparent et appliquent des pesticides, comme les utilisateurs de : alachlore, aldicarbe, benomyil, chlorpyrifos, carbaryl, carbofuran chlorothalonil, coumaphos, cyperméthrine, dichlorvos, DDT, diméthoate, malathion, mancozèbe, méthomyil, parathion, perméthrine, propinèbe, S-éthyl-dipropylthiocarbamate, tétraméthrine, trifluraline. L'utilisation professionnelle de pesticides est également associée à une diminution de la capacité fonctionnelle des poumons (par exemple, les insecticides organophosphorés et carbamates). Les cancers du poumon ont également été associés à l'utilisation de certains pesticides et il ne faut pas oublier que des substances cancérigènes autres que les ingrédients actifs peuvent être présentes dans les formulations commerciales (par exemple, les dioxines dans les mélanges à base d'herbicides phénoxy comme le 2,4-D, le MCPA et le 2,4,5-T).⁵¹⁷

Bien que certains pesticides soient interdits depuis des décennies, on en trouve encore et ils nuisent à notre santé. Au Canada, la présence de DDT (trouvé chez 10% des sujets) et de son métabolite le DDE (chez plus de 99% des sujets) a été liée à un dysfonctionnement pulmonaire (par exemple, une capacité respiratoire réduite), à la bronchite et à l'asthme.⁵⁴¹ Les organophosphorés et les carbamates étaient associés à la bronchite chronique.⁵⁰⁰

Dans la population générale, l'existence d'une corrélation entre l'exposition à certains insecticides, tels que les organophosphorés, les pyréthroïdes et les organochlorés (par exemple le DDT), et les dysfonctionnements du système respiratoire a été détectée.⁵⁴² Il y a donc un signal très inquiétant depuis un certain temps, car habituellement ce type de problème (asthme et bronchite associés à l'exposition aux pesticides) était enregistré chez les sujets exposés professionnellement et non dans la population générale.⁵⁸¹

L'utilisation d'herbicides ou d'insecticides par les parents augmente la probabilité de diagnostiquer de l'asthme chez leurs enfants avant l'âge de cinq ans.⁵¹⁶ Aux États-Unis, au moins 15% des agriculteurs utilisant des pesticides souffrent d'asthme, de sinusite chronique et/ou de bronchite chronique.⁵⁰² Chez les agriculteurs américains de sexe masculin, l'asthme a été reconnu comme l'une des maladies professionnelles les plus fréquentes, et a été associé à l'utilisation du coumaphos, de l'heptachlore, du parathion et du dibromoéthylène. Dans le cas des femmes, l'asthme a été associé à l'utilisation de carbaryl, coumaphos, DDT, malthion, parathion, perméthrine, 2,4-D, glyphosate et métalaxyl.⁵⁰⁰

L'ACTION ANTIBIOTIQUE DES INSECTICIDES ORGANOPHOSPHORÉS

Les pesticides qui endommagent les bactéries ont également des effets négatifs sur notre santé. Des altérations de la composition de la communauté des micro-organismes intestinaux humains ont été associées à certaines maladies telles que l'obésité, le diabète, les maladies cardiovasculaires, le cancer du côlon et la cirrhose du foie.⁴⁹⁵ L'altération du microbiome intestinal réduit la capacité à détoxifier certaines substances, la capacité à en digérer d'autres (par exemple, certains glucides) et réduit la disponibilité de substances utiles produites par des micro-organismes symbiotiques (par exemple, certaines vitamines).

À cet égard, il est utile de signaler la modification de la composition de la communauté bactérienne dans les intestins de l'homme et du rat générée par le chlorpyrifos ou le dazinon, qui sont des insecticides organophosphorés.^{493, 495, 524} Chez le rat, l'exposition prénatale (pendant la gestation) au chlorpyrifos génère plusieurs altérations telles qu'une taille réduite à la naissance,

des modifications de l'épithélium intestinal (il sera plus fin) et de la composition de la flore intestinale ; la distribution de la flore intestinale est également modifiée car les bactéries se déplaceront plus facilement vers d'autres parties du corps à travers les épithéliums.⁵²⁴ Il convient de rappeler qu'au moins 10^{14} bactéries (le chiffre un suivi de 14 zéros), appartenant à au moins 400 espèces différentes, résident dans l'intestin humain. L'exposition *in utero* à des pesticides tels que les insecticides organophosphorés peut endommager la capacité de l'intestin à les absorber. L'altération de l'équilibre microbien dans l'intestin prédispose à diverses maladies. Malheureusement, ces insecticides sont largement utilisés et se retrouvent donc facilement dans les aliments. L'exposition moyenne par ingestion de la population aux Etats-Unis est considérée comme étant comprise entre 8×10^{-6} et 34×10^{-6} mg par kilogramme de poids corporel par jour, tandis qu'en France, chez les adultes, elle est estimée entre 0,01 et 0,14 mg par kilogramme de poids corporel par jour. Chez les enfants, en France, l'exposition a été estimée jusqu'à 0,15 mg par kilogramme de poids corporel et par jour (en 2011) ; il faut remarquer que les enfants sont plus sensibles que les adultes et que ces insecticides traversent la barrière formée par le placenta.⁵²⁴

Le diazinon, un autre insecticide organophosphoré, provoque des modifications de la composition des micro-organismes dans l'intestin des souris de manière différente selon le sexe, les mâles subissant les principaux effets négatifs.⁴⁹⁵ Ces informations suggèrent que les modèles expérimentaux pour les tests préliminaires de toxicité doivent tenir compte du sexe et de l'âge.

Dans de rares cas, les micro-organismes peuvent utiliser les pesticides comme nutriments et seront donc favorisés. Par exemple, les staphylocoques présents dans le sol peuvent dégrader le chlorpyrifos.⁵²⁴ Dans certains cas, les micro-organismes transforment les pesticides en molécules dérivées qui peuvent être aussi ou plus toxiques (les dérivés peuvent agir négativement avec des mécanismes d'action différents de ceux de la molécule de départ).

GLYPHOSATE ET MICRO-ORGANISMES INTESTINAUX

Il peut être utile de rappeler que certains pesticides sont également enregistrés comme antibiotiques, comme c'est le cas du glyphosate. D'autres molécules utilisées pour l'action bactéricide sont les triazines-S-triones et les agents libérateurs de chlore.⁵¹⁷ Les substances qui modifient la composition du microbiome ont des effets variés. Les bactéries intestinales potentiellement dangereuses (par exemple *Salmonella* spp et *Clostridium* spp) peuvent être très résistantes à l'action antibiotique du glyphosate, tandis que d'autres bactéries potentiellement très utiles (par exemple *Bifidobacterium* spp et *Lactobacillus* spp) peuvent être sensibles.⁵²⁴ Cet effet a été observé dans la flore intestinale des poulets, où les bactéries pathogènes peuvent être résistantes au glyphosate et, par conséquent, être favorisées lorsqu'il est présent dans les aliments et l'eau (*Salmonella gallinarum*, *Salmonella enteritidis*, *Salmonella typhimurium*, *Clostridium perfringens* et *Clostridium botulinum*).⁵⁵²

Chez les bovins, l'augmentation des troubles causés par la présence d'une bactérie, l'agent du botulisme (*Clostridium botulinum*), est favorisée par l'ingestion de molécules antibiotiques comme le glyphosate. Cet herbicide inhibe la croissance des bactéries intestinales telles que les lactobacilles et les entérocoques, qui sont normalement présentes dans l'intestin et sont capables de s'opposer au développement de pathogènes tels que *Clostridium botulinum*. Chez les bovins, l'ingestion de glyphosate endommage les micro-organismes qui constituent la défense naturelle contre l'attaque des bactéries pathogènes.⁵³⁴ De nombreuses bactéries présentes dans les intestins des bovins sont capables de produire des bactériocines (agents antibactériens naturels) qui sont actives contre *Clostridium botulinum*. L'ingestion de l'herbicide favorise les maladies bactériennes par des micro-organismes résistants à l'action biocide de ce pesticide, comme l'agent botulique, et réduit les défenses par des antagonistes naturels.

Des concentrations de l'herbicide glyphosate considérées comme sûres dans l'eau potable ont enregistré des effets indésirables chez les animaux de laboratoire. L'administration de glyphosate à des concentrations considérées comme sûres pour l'eau potable aux Etats-Unis (1,75 mg/kg pc/jour) a enregistré des changements significatifs dans la composition de la flore intestinale mesurée dans les fèces de rat. Des concentrations réduites peuvent avoir un effet négatif sur la composition du microbiome intestinal, en favorisant certains microbes et en diminuant la concentration d'autres (*Lactobacillus*).¹¹⁷⁴ Ces effets négatifs ont également été enregistrés dans les premiers stades du développement. Le microbiome est essentiel au maintien de la santé car il remplit des fonctions importantes : ces effets peuvent être attendus à des concentrations très faibles, considérées comme sûres.

Le glyphosate se retrouve également à des concentrations inquiétantes dans le lait maternel (jusqu'à 166 mg/L).¹¹⁷⁴ Par conséquent, les nourrissons peuvent être exposés pendant l'allaitement, ce qui a un effet négatif sur l'écosystème microbien intestinal (et autre) au début de la vie.

L'action antibactérienne générée par certaines substances affecte les symbioses qui ont évolué pendant des millions d'années entre les micro-organismes, et entre les micro-organismes et les organismes multicellulaires tels que les insectes et les mammifères. Les micro-organismes qui remplissent des fonctions utiles, comme ceux de l'intestin, sont similaires ou identiques dans le règne animal. L'action des antibiotiques génère donc des effets dévastateurs dans des organismes apparemment très différents comme les humains, les vaches, les poulets et les abeilles. Une fois encore, nous trouvons des similitudes avec les effets sublétaux générés par certains pesticides sur les abeilles. Malheureusement, l'action antibiotique des pesticides endommage également le sol et le règne végétal. Les symbioses entre les micro-organismes et les plantes étant importantes et nécessaires, l'action antibactérienne étend la portée létale des pesticides à une partie beaucoup plus large de la biosphère, n'épargnant personne : plantes, animaux, champignons et tous les écosystèmes terrestres, aquatiques et marins. Les changements négatifs sont dangereusement amplifiés par ce type d'arsenal chimique : nous n'avons pas besoin de plus d'informations pour prédire des effets désastreux.

LES MICRO-ORGANISMES DANS LE SOL

Les plantes interagissent avec des milliers de micro-organismes qui vivent dans la rhizosphère, la zone du sol entourant les racines ou sur les feuilles. Les effectifs du microbiome végétal sont très élevés : jusqu'à 10^{11} cellules microbiennes par gramme de racine.⁵⁷⁹

Le nom de champignons mycorhiziens désigne un groupe remarquablement hétérogène de champignons mycorhiziens qui établissent des associations, appelées mycorhizes, avec les racines de presque toutes les plantes présentes sur Terre. La fonction des symbioses mycorhiziennes est un échange : la plante améliore sa nutrition minérale, ce qui a un effet positif sur la croissance, et, en retour, donne des sucres au champignon. Grâce à la symbiose mycorhizienne, la plante devient plus résistante aux stress biotiques ou abiotiques, augmente sa tolérance au manque d'eau ou à la présence de polluants, et réduit sa sensibilité aux agents pathogènes les plus courants. Un type de symbiose mycorhizienne est la symbiose dite à arbuscules, qui est la plus ancienne (des structures similaires aux mycorhizes à arbuscules sont documentées par des fossiles datant du Dévonien, c'est-à-dire il y a 400 millions d'années) ; les mycorhizes à arbuscules concernent la plupart des plantes herbacées cultivées comme le riz, le maïs et les tomates.⁵⁷⁹ Le développement de la symbiose peut être divisé en trois étapes principales : une première étape au cours de laquelle les deux organismes, qui n'ont pas encore établi de contact direct, échangent des messages chimiques dans un véritable dialogue moléculaire ; une deuxième étape au cours de laquelle le contact a lieu et, enfin, l'événement de

colonisation proprement dit, avec la formation d'arbuscules intra-racinaires et l'acquisition de la pleine fonctionnalité de la symbiose. Des exemples bien connus de symbioses mycorhiziennes sont celles entre les truffes et les chênes, ou entre les cèpes et les châtaigniers. La plante hôte réagit aux signaux fongiques, au contact, à la colonisation puis à la formation d'arbustes par des changements extraordinaires, tant au niveau de l'organisation cellulaire que de l'expression génétique. La symbiose mycorhizienne génère une résistance accrue aux bactéries pathogènes et améliore la qualité et la quantité des fruits (l'expression génétique sera modifiée). Une augmentation significative des composés antioxydants a été enregistrée dans les tomates issues de plantes mycorhizées.⁵⁷⁹

L'impact des champignons symbiotiques sur la physiologie de la racine et de la plante dans son ensemble est extraordinaire : de nombreuses fonctions sont activées, comme celles liées à l'absorption et au transfert des nutriments du sol vers la plante, les processus de défense, les processus morphogénétiques (comme ceux liés au développement du système racinaire) et, étonnamment, les événements contrôlant la fertilité de la plante sont également favorisés. Les micro-organismes du sol tels que les champignons mycorhiziens sont certainement des composants importants de la santé des plantes et doivent être sauvegardés.

La fertilité du sol dépend de la santé des organismes qui résident à quelques centimètres de profondeur, et on peut dire que notre survie dépend de ce mince écosystème que nous dégradons très rapidement.

LE GLYPHOSATE ET LA RHIZOSPHERE

Les plantes ont développé différents types de symbioses avec les micro-organismes et, comme nous, elles abritent des milliards de bactéries : dans les feuilles ou l'écorce (phyllosphère), dans les espaces entre les cellules (endophytes) mais le plus grand nombre se trouve autour des racines.⁹⁸⁶ Certaines plantes consacrent jusqu'à 40% de l'énergie qu'elles obtiennent par photosynthèse au soutien de symbioses telles que la symbiose racinaire : le rhizobiome. En donnant des sucres et d'autres substances, les plantes favorisent certains micro-organismes utiles à leur propre survie. Les plantes ont donc la capacité de sélectionner les micro-organismes les plus utiles autour de leurs racines : c'est la rhizosphère. On pourrait dire que certaines plantes en particulier sélectionnent les micro-organismes du sol les plus utiles pour répondre à leurs besoins.

Les pesticides peuvent altérer la composition microbienne du sol. Aux États-Unis, les plantes de soja génétiquement modifiées pour résister à l'herbicide glyphosate ont été commercialisées en 1996. En 2008, d'autres plantes résistantes à l'herbicide ont été commercialisées grâce à différentes modifications génétiques.⁵³⁵ Le glyphosate endommage les micro-organismes qui vivent en symbiose avec les racines.⁵⁵² L'utilisation de l'herbicide glyphosate dans les plantes de soja (*Glycine max*) qui ont été génétiquement modifiées pour être résistantes à sa phytotoxicité est affectée par les effets sur les microorganismes du sol. Le glyphosate endommage les interactions complexes entre les micro-organismes du sol et les racines de la plante de soja, ce qui entraîne une diminution de la croissance des racines. Les autres effets signalés par le glyphosate dans les cultures de soja résistantes à cet herbicide étaient les suivants :⁵³⁵

- Réduction de la photosynthèse chlorophyllienne entraînant une diminution de la teneur en lignine.
- Une augmentation de la présence dans les racines de champignons qui sont des espèces phytopathogènes comme le *Fusarium* (produit des pourritures). Cet effet sur les plantes de soja génétiquement modifié a été observé même en utilisant les plus faibles doses recommandées de glyphosate (720 g/ha, comme indiqué sur l'étiquette du produit

commercial). Les *fusarium* sont également préoccupants pour la santé car ils peuvent produire des mycotoxines nocives pour les humains et les animaux. Les plantes de soja qui ne sont pas résistantes aux herbicides présentent une colonisation moindre par ces champignons phytopathogènes. Cet effet, à savoir une colonisation accrue des racines par le champignon *Fusarium* suite à des traitements au glyphosate, a également été observé sur des cotonniers résistants aux herbicides (il s'agit de plantes génétiquement modifiées).

- Certains micro-organismes du sol (par exemple, les *Pseudomonas*) produisent des substances chimiques qui régulent la croissance des plantes (phytohormones telles que les auxines). La présence de glyphosate réduit la production de ces hormones, utiles à la croissance de plantes comme le soja, et diminue la présence de certaines bactéries (comme les *Pseudomonas*).
- La réduction du poids des pousses et des racines de la plante de soja : en particulier la biomasse des racines est considérablement réduite.

L'agriculture traditionnelle fait un usage intensif d'herbicides car le désherbage mécanique n'est pas possible (cultures en pleine végétation) ou est plus coûteux. Avec la généralisation des pratiques de travail minimum du sol dans certaines cultures, l'utilisation d'herbicides a augmenté. Pour les cultures telles que les céréales, cela implique une utilisation accrue d'herbicides tels que le glyphosate.⁵³⁶ Dans les plantes, et dans certains champignons et bactéries, cet herbicide inhibe la production de certains acides aminés aromatiques ; dans les plantes, ces acides aminés peuvent être utilisés pour produire des phytohormones ou des molécules du système de défense.

Certaines bactéries du sol et de la rhizosphère sont résistantes à l'action biocide du glyphosate et seront donc favorisées par l'utilisation de cet herbicide antibiotique. Ainsi, l'utilisation du glyphosate modifie l'écosystème du sol en favorisant les micro-organismes tels que les bactéries et les champignons qui sont résistants à son action. Au Canada, l'influence du glyphosate sur les mycorhizes a été mesurée dans des cultures de blé et de pois. L'utilisation du glyphosate entraîne des altérations par deux mécanismes : elle favorise les micro-organismes résistants au principe actif et modifie la physiologie des symbioses. Le glyphosate favorise le développement de champignons phytopathogènes et endommage également les symbioses entre les micro-organismes fixateurs d'azote et les légumineuses.⁵³⁶

La tolérance au glyphosate est plus répandue parmi les bactéries que parmi les champignons dans la rhizosphère, de sorte que certaines bactéries seront favorisées (par exemple, les Gram-négatifs résistants au glyphosate tels que *Pseudomonas*) et la composition de la communauté des microorganismes du sol changera. En raison des monocultures perpétuées sur de grandes surfaces et de l'utilisation systématique d'herbicides, l'écosystème du sol est altéré. Il convient de remarquer que 72.000 espèces de champignons ont été classées et que celles-ci représentent probablement moins de 5% des espèces estimées existantes. Il est donc raisonnablement prévisible que cette catégorie d'êtres vivants, comme de nombreux micro-organismes du sol, seront endommagés et éteints par l'agriculture chimique avant même d'être identifiés. En conclusion, l'application de l'herbicide glyphosate modifie l'équilibre de la rhizosphère en favorisant le développement des pathogènes et en réduisant la croissance des plantes qu'il est censé protéger.

CANCER

Le mot cancer a été attribué à Hippocrate (460-370 avant Jésus-Christ) qui a observé ses ramifications qu'il a associées à la forme du crabe (d'où le mot grec pour cancer) et, selon des recherches menées dans les années 1920, le cancer était presque inconnu des peuples primitifs.²⁸⁰ L'incidence du cancer est mesurée depuis 1880. Bien que les données du passé ne soient pas aussi complètes que les données plus récentes, elles indiquent une augmentation continue (depuis que l'incidence du cancer a été enregistrée pour la première fois). Plus de 200 maladies tumorales ont été classées. Elles peuvent se produire dans n'importe quelle partie du corps et se caractérisent par une croissance cellulaire anormale, sans rapport avec les mécanismes de contrôle normaux de l'organisme.⁵⁷² Le processus de transformation d'une cellule normale en une cellule néoplasique se déroule en plusieurs étapes avec l'accumulation d'anomalies génétiques, fonctionnelles et morphologiques. La prolifération (division cellulaire) est un processus physiologique fondamental : il existe normalement un équilibre entre la prolifération et la mort cellulaire programmée (apoptose). Les mutations de l'ADN qui conduisent au cancer perturbent ces processus ordonnés, favorisant la division cellulaire incontrôlée et la formation de tumeurs. Le processus de transformation peut nécessiter plus d'une mutation dans différentes classes de gènes : ceux qui contrôlent la division cellulaire, la mort cellulaire et les processus de réparation de l'ADN. Le corps humain est capable, grâce à des processus de réparation et à l'activation du système immunitaire, de contrecarrer les processus de transformation, mais lorsque cette capacité fait défaut, la cellule se transforme en cellule tumorale à travers différentes étapes. L'activation des gènes favorisant la croissance (oncogènes) et l'inactivation des gènes inhibant la croissance (oncosuppresseurs) sont donc nécessaires. La cancérogenèse est un processus long et complexe : il est rare qu'une seule altération génétique suffise au développement d'une tumeur. En général, un agent cancérigène agit sur l'ADN cellulaire et provoque un processus d'initiation (rapide et irréversible), suivi d'une phase de promotion de la croissance néoplasique (lente et irréversible). D'autres facteurs doivent intervenir pour favoriser la progression de la maladie, qui prend dans la plupart des cas plusieurs années.

En Italie, les données de l'Institut national de la statistique (ISTAT) indiquent, pour 2016 (les dernières données disponibles au moment de la rédaction de ce paragraphe), qu'il y a eu un peu plus de 179.000 décès attribuables au cancer, parmi les 600.000 décès survenus cette année-là. Le cancer est la deuxième cause de décès (29% de tous les décès), après les maladies cardiovasculaires (37%). Chez les hommes, les cancers et les maladies cardio-circulatoires causent approximativement le même nombre de décès (34%), alors que chez les femmes, les maladies cardio-circulatoires sont plus importantes que les cancers (40% contre 25%). Dans les régions italiennes où les registres du cancer sont actifs, la fréquence des décès causés par le cancer est en moyenne d'environ 3,5 décès pour 1.000 hommes et d'environ 2,5 décès pour 1.000 femmes chaque année (globalement, environ 3 décès pour 1.000 personnes). En Italie, au moins 485 personnes meurent du cancer chaque jour.^{572, 573} Les données concernant les zones couvertes par les registres des tumeurs indiquent que la première cause de décès par cancer dans la population est le cancer du poumon (12%) : la première cause de décès par cancer chez les hommes est le cancer du poumon (27%), tandis que chez les femmes, c'est le cancer du sein (17%).

LA PROPAGATION DU CANCER EN EUROPE ET EN ITALIE

Pour comprendre la gravité du phénomène, il est utile de disposer de quelques informations sur la fréquence d'enregistrement des différents types de cancer. Il convient de souligner que c'est l'ordre de grandeur qui est l'information à saisir et non le nombre exact.

En 2014, en Europe (UE-28), 1,3 million de personnes sont mortes d'un cancer, soit plus d'un quart (26,4%) du nombre total de décès. Le cancer représentait une part légèrement plus élevée (29,7%) des décès chez les hommes que chez les femmes (23,2%).³⁰⁵ La part des décès par cancer dans le nombre total de décès dépassait 30% au Danemark, en Irlande, aux Pays-Bas et en Slovénie (en Slovénie, chez les hommes, cette part atteignait 36,1%).

En Italie, le nombre de décès dus au cancer sur le nombre total de décès est de 28,3%, avec une prévalence chez les hommes de 32,9% contre 24% chez les femmes.

En Europe (UE-28), le taux de mortalité standardisé pour le cancer était de 261,5 décès pour 100.000 habitants, soit un taux inférieur à celui des maladies circulatoires, mais supérieur à celui de la plupart des autres causes de décès. Les pays industrialisés enregistrent même plus de 300 décès par cancer pour 100.000 habitants (par exemple, la France, l'Australie, le Canada) : en Italie, 246,6.^{280, 500} Selon les informations recueillies par le Registre national du cancer, en Italie, la probabilité de se voir diagnostiquer une tumeur au cours de sa vie (0-84 ans) est d'un homme sur deux et d'une femme sur trois (actuellement, l'espérance de vie à la naissance est de 84,6 ans pour les filles et de 80,1 ans pour les garçons).⁵⁷² Pour les Italiens, la probabilité de mourir d'un cancer au cours de leur vie est de 1 sur 3 pour les hommes et de 1 sur 6 pour les femmes.

En 2019, 371.000 nouveaux cas de cancer ont été diagnostiqués en Italie et, en 2016, 179.000 personnes sont mortes du cancer.⁵⁷² En détail, si l'on considère l'ensemble de la population et que l'on exclut le cancer de la peau, les organes malades de cancer les plus fréquemment enregistrés étaient les suivants : sein (14%), colorectal (13%), poumon (11%), prostate (10%) et vessie (8%). À l'exclusion du cancer de la peau, les cinq cancers les plus fréquemment diagnostiqués chez les hommes étaient la prostate (19%), le poumon (15%), le colorectum (14%), la vessie (12%) et l'estomac (4%) ; chez les femmes, le sein (30%), le colorectum (12%), le poumon (12%), la thyroïde (5%) et l'utérus (5%).⁵⁷²

En Italie, le cancer du poumon est la cause la plus fréquente de décès à cause d'un cancer, suivi par le cancer colorectal et le cancer du sein. En Italie, au cours d'une vie (0-84 ans), un homme sur onze risque d'avoir un cancer du poumon, un sur neuf un cancer de la prostate et une femme sur neuf un cancer du sein.

En Italie, en 2019, en ce qui concerne la prévalence, il y avait environ 3.460.000 personnes vivantes avec un diagnostic antérieur de cancer : 30% des hommes prévalents avaient un diagnostic antérieur de cancer de la prostate et 44% des femmes prévalentes avaient un diagnostic antérieur de cancer du sein. En 2019, l'Italie comptait 60.391.000 résidents, dont 55.175.000 étaient des ressortissants italiens : environ 6% ont reçu un diagnostic de cancer.⁵⁷³

En Italie, la survie à 5 ans après un diagnostic de cancer a augmenté, par rapport à celle des cas diagnostiqués au cours des périodes quinquennales précédentes, tant pour les hommes (54% en 2005-2009, contre 51% en 2000-2004, 46% en 1995-1999 et 39% en 1990-1994) que pour les femmes (63% de survie contre 60%, 58% et 55% pour les mêmes années).⁵⁷² En Italie, la survie à 5 ans après le diagnostic du cancer était plus faible qu'aux États-Unis et en Australie.⁵⁷²

En Italie, selon un rapport officiel, mis à jour en 2014 et publié en 2019, l'incidence du cancer diminue chez les hommes et les femmes. En particulier, chez les hommes, l'incidence de tous les cancers a connu une baisse significative au cours de la période 2003-2014 (-0,9% par an).⁵⁷² Certains cancers, en revanche, sont en augmentation, comme le cancer du sein et du poumon

chez la femme, le cancer du testicule, le cancer du cerveau, les lymphomes et les tumeurs chez les enfants et les adolescents.^{500, 572}

En Europe (UE-28), en 2015, environ 7,3 millions de patients admis dans les hôpitaux ont été traités pour des néoplasmes (données 2014 pour la Belgique, pas de données pour la Grèce ou les Pays-Bas).³⁰⁵ Le taux de sortie de l'hôpital le plus élevé, enregistré pour tous les néoplasmes, a été enregistré en Autriche : après le diagnostic ou le traitement de néoplasmes, 2 900 patients pour 100.000 habitants sont sortis du milieu hospitalier. En Allemagne, en Hongrie, en Bulgarie et en Estonie (données 2014), ce taux a dépassé 2.000 pour 100.000 habitants. L'Italie avait un taux d'environ 1.500 patients pour 100.000 habitants. Ainsi, chaque année, entre 1,7% (en Italie) et 3% (en Autriche) de la population enregistre une tumeur. En Italie, environ 16% des nouveaux patients atteints de cancer meurent (246/1.500). Malheureusement, certains types de cancer se développent à des taux bien plus élevés que la moyenne annoncée de 2 à 3%. En France, par exemple, l'incidence du cancer de la prostate a augmenté de 6,3% entre 1980 et 2005, et celle du cancer de la thyroïde de 6%.²⁸⁰

Dans le monde, l'incidence (taux standardisé) du cancer chez les enfants (0-14 ans) est passée de 124 cas par million d'enfants en 1980 à plus de 140 en 2010.⁵⁰⁰ Le cancer est la première cause de décès chez les enfants dans le monde.⁵²¹ Les cancers les plus fréquents chez les enfants (0-14 ans) sont les leucémies, les tumeurs cérébrales et les lymphomes, ceux des garçons (15-19 ans) sont les lymphomes, les tumeurs épithéliales et les mélanomes.⁵²¹

Aux États-Unis, le cancer (leucémie et tumeurs cérébrales) est la deuxième cause de décès chez les enfants âgés d'un à quatorze ans (la première étant la mort accidentelle).²⁸⁰ Des études montrent que l'exposition des mères à certaines substances augmente la probabilité de cancer chez leurs enfants. L'exposition professionnelle des mères aux insecticides et aux herbicides augmente la probabilité que leurs enfants développent une leucémie.³²⁸

En Italie, chez les jeunes, le cancer des testicules est le plus fréquent, tandis que dans la tranche d'âge des 50-69 ans et chez les plus de 70 ans, le cancer le plus fréquent est celui de la prostate.⁵⁷² Dans les premières décennies de la vie, la fréquence des tumeurs est en effet très faible, s'élevant à quelques dizaines de cas pour 100.000 enfants par an ; après 35 ans, on compte plus d'une centaine de cas, tandis qu'après 60 ans, l'incidence augmente fortement, atteignant plus de mille cas pour 100.000 personnes par an.⁵⁷²

Certaines régions d'Italie (les registres d'Ombrie, de Romagne, de Modène et de Parme) signalent une incidence de tumeurs chez les enfants (0-14 ans) de 200 cas par million d'enfants chaque année, contre une moyenne nationale, en 2010, de 140.⁵³¹ La survie des tumeurs pédiatriques a considérablement augmenté au cours des dernières décennies, mais il est également vrai qu'au cours de leur vie, les survivants présentent des complications dans deux tiers des cas (graves dans environ 25% ; l'incidence des complications augmente avec l'âge), et des taux d'hospitalisation, calculés jusqu'à 30 ans après le diagnostic, supérieurs à ceux de la population générale.

Le progrès a eu pour effet secondaire d'augmenter la fréquence de certaines maladies, bien que dans certains cas, cette augmentation soit liée à des facteurs tels que l'augmentation de l'espérance de vie, l'amélioration des diagnostics ou la prédisposition génétique. En ce qui concerne l'origine génétique, une étude, qui a examiné 44.788 paires de jumeaux en Europe du Nord pour évaluer les risques de 28 types de cancer, conclut que les causes environnementales sont plus importantes que les causes génétiques.³⁰⁶ L'augmentation, depuis l'ère de la révolution industrielle, des maladies enregistrées chez les travailleurs constitue également une preuve irréfutable des causes anthropiques. On se souvient du cancer du scrotum enregistré à la fin des années 1700 chez les ramoneurs parce qu'ils étaient en contact avec la suie. En 1830, une terrible maladie est enregistrée chez les ouvriers des usines d'allumettes (industrie du phosphore).²⁸⁰ Une étude portant sur plus de 200.000 jumeaux dans un registre scandinave a estimé que la composante héréditaire du cancer est de 33%, avec une énorme variabilité entre

les différents types de cancer.⁵⁷² L'exposition des parents, qu'elle soit professionnelle ou domestique, augmente la probabilité d'enregistrer des cancers (par exemple, la leucémie) chez leurs enfants.^{509, 515}

Les ressources consacrées à la lutte contre cette crise sanitaire sont basées sur l'investissement dans le diagnostic et le traitement (pharmaceutique, chirurgical et radiothérapie) plutôt que sur la réduction des causes telles que la pollution et les modes de vie. Pour réduire fortement l'enregistrement de ces maladies, il faut agir sur la prévention. Toutefois, les investissements dans le diagnostic et le traitement ont permis d'augmenter les taux de survie pour certains cancers.

LE TABAGISME ET LES MODES DE VIE

En 2017, dans le monde, la consommation de tabac était probablement responsable de 14,5% du total des décès enregistrés (1,2 million de décès attribuables au tabagisme passif sur 8,1 millions de décès) et de trente-huit millions d'années vécues avec un handicap.⁵⁷⁴ On estime qu'il y a environ 1,3 milliard de fumeurs dans le monde et, en Italie, probablement une personne sur quatre fume : la consommation quotidienne moyenne en Italie est d'environ 11 cigarettes, mais près de 2 fumeurs sur 10 consomment plus d'un paquet par jour.^{572, 575, 576, 985}

En 2015, en Italie, au moins 16% des cigarettes ont fait l'objet d'un commerce illégal, alors qu'en Europe ce commerce représentait environ 10% de la consommation totale de cigarettes (contrebande et contrefaçon ; l'Italie est le premier producteur européen de tabac).⁹⁸⁷

Selon l'Organisation mondiale de la santé, le tabac peut tuer jusqu'à la moitié de ses consommateurs : au moins huit millions de personnes par an, soit plus de trois fois le nombre de victimes du Covid-19 prévu en 2020. Le tabagisme est la principale cause de décès facilement évitable sur la planète. Un gros fumeur a, en moyenne, une espérance de vie de 10 ans inférieure à celle qu'il aurait eue s'il n'avait pas fumé.

Au moins 7.000 substances chimiques différentes ont été identifiées dans la fumée de cigarette (arsenic, cadmium, plomb, pyridine, cyanure d'hydrogène, nicotine, ammoniac, etc.), dont des centaines sont très dangereuses et au moins 70 sont cancérigènes (par exemple, le chlorure de vinyle, le formaldéhyde, le polonium-210, les nitrosamines, les hydrocarbures aromatiques polycycliques comme le benzo-a-pyrène). L'exposition à la fumée de cigarette peut être mesurée en déterminant les concentrations de substances toxiques dans l'urine.

Plusieurs centaines d'additifs sont ajoutés intentionnellement lors de la fabrication des cigarettes dans le but de favoriser la consommation et la dépendance (sucres, arômes tels que la réglisse, ammoniac, bronchodilatateurs, analgésiques, substances qui contrôlent la vitesse de combustion, etc.) Il est très difficile d'arrêter de fumer : 70% des fumeurs disent vouloir arrêter, 40% essaient d'arrêter au moins une fois par an, 80% de ceux qui ont essayé d'arrêter de fumer recommencent dans les 30 jours suivant leur dernière cigarette, et moins de 3% réussissent à atteindre leur objectif d'arrêt.¹²⁸⁷

Deux tiers de tous les fumeurs actuels ont commencé à fumer à l'âge de 20 ans et 89% des nouveaux fumeurs développent une dépendance avant l'âge de 25 ans. C'est un problème car le succès de la lutte contre le tabagisme dépend en grande partie de l'éloignement des jeunes des cigarettes traditionnelles et de tous les produits alternatifs. Il est très probable que les personnes qui ne fument pas avant l'âge de 25 ans resteront non-fumeurs toute leur vie.¹²⁸⁸ Essayer d'arrêter de fumer en bénéficiant d'un soutien médical, psychologique et d'une thérapie de sevrage du tabac peut tripler les chances de réussite.

La culture, la production et la commercialisation du tabac représentent un énorme gaspillage de ressources. La culture utilise des pesticides, des engrais et contribue à la réduction de la biodiversité : la culture occupe au moins 4 millions d'hectares dans 124 pays. Les plus

grands producteurs de tabac sont, par ordre décroissant : la Chine, l'Inde, le Brésil et les États-Unis ; l'Italie est le plus grand producteur de tabac d'Europe (au moins 17 000 hectares en 2019, principalement en Campanie, en Vénétie, en Ombrie et en Toscane). Selon l'ONU, le tabagisme emploie au moins 100 millions de travailleurs, dont une grande partie cultive le tabac dans des pays où la malnutrition et la faim constituent un problème grave. Un autre aspect négatif est le travail des enfants très répandu dans la culture du tabac, qui est également dénoncé en Italie, tout comme l'exploitation des migrants.¹²⁸⁷

Environ 3,7 litres d'eau sont utilisés pour produire une cigarette et pour compenser les émissions produites par un fumeur en un an, il faut planter plus de 130 arbres et les laisser pousser pendant au moins 10 ans.¹²⁸⁷ Jusqu'à un tiers des déchets sur les plages sont des mégots de cigarettes, qui ne sont pas biodégradables.

Aux États-Unis, le tabagisme est responsable de 33% des néoplasmes ; 33% supplémentaires sont liés à ce que l'on appelle les modes de vie : alimentation, surpoids, abus d'alcool et sédentarité.⁵⁷² Aux États-Unis, les facteurs professionnels sont responsables de 5% des néoplasmes et les infections de 8% (*virus du papillome*, virus d'Epstein-Barr, virus des hépatites B et C, etc.) Au Royaume-Uni, le tabac est responsable de 19% des cancers et l'alimentation de 19% supplémentaires.⁵⁷²

En Italie, on estime qu'en 2017, 14,5% de tous les décès étaient attribuables au tabagisme (soit l'équivalent de 90.000 décès, dont 7.000 dus au tabagisme passif) et étaient responsables de 552.000 années d'invalidité.⁵⁷⁴

Aux États-Unis, on estime qu'en 2014, 42% de tous les cancers chez les adultes de plus de 30 ans étaient attribuables à sept facteurs de risque :

- le tabagisme actif et passif,
- l'excès de poids corporel,
- la consommation d'alcool,
- régime alimentaire,
- le rayonnement ultraviolet,
- les infections virales.

Il convient de souligner que, selon les statistiques officielles, entre un tiers et 50% des cancers en Italie pourraient être évités en agissant sur les modes de vie : tabagisme, sédentarité, exposition aux rayons ultraviolets (y compris les lampes à bronzer, qui favorisent les mélanomes), alcool et alimentation. En agissant sur la culture, les connaissances et, par conséquent, en prévenant et en changeant les mauvaises habitudes, nous pourrions espérer réduire jusqu'à 50% de tous les cancers enregistrés. L'échec de ce défi confirme l'incapacité de la société à se défendre contre elle-même et en particulier contre les comportements promus par quelques grandes entreprises comme le tabac, les pesticides et certaines entreprises alimentaires.

Dans notre expérience quotidienne, nous pouvons facilement percevoir des comportements sociaux paradoxaux, c'est-à-dire sans logique, car ils causent des dommages à notre santé, à l'environnement et aux générations futures. Les actions de ce type sont facilement discernables par quiconque, tant dans l'expérience de la vie quotidienne que dans les actions collectives. En partant de loin avec ce discours, il est possible de constater que certaines des plus grandes sources de dépenses de santé, en Italie et en Europe, sont le résultat d'actions individuelles. Ces actions sont favorisées par un système malade, qui pourrait facilement être guéri, générant un gain économique (et pas seulement) pour l'ensemble de la société. Il est très évident, sur tant de sujets, que la société et les individus connaissent le problème, le perçoivent et sont capables de l'identifier efficacement, mais les actions générées pour l'enrayer sont totalement insignifiantes et contradictoires. Il existe une sorte de divergence entre la capacité de la science et de la technologie à fournir des informations, des connaissances et des innovations, et la capacité de la société à utiliser cette richesse pour les meilleures applications. Les règles

artificielles, telles que les règles économiques et financières, sont privilégiées par rapport à celles que la nature nous enseigne ou que la science suggère. Par exemple, les données de l'Organisation mondiale de la santé (OMS) montrent que 86% des décès et 75% des dépenses de santé en Europe et en Italie sont dus à des maladies chroniques favorisées et aggravées par quatre principaux facteurs de risque : ⁸⁸⁸

- le tabagisme,
- l'abus d'alcool,
- une mauvaise alimentation,
- l'inactivité physique.

Dans le monde, les maladies cardiovasculaires, les cancers, les maladies respiratoires et le diabète sont, selon les données de l'OMS, responsables de la majorité des décès, des souffrances et des coûts de santé. Il s'agit de maladies chroniques qui ont en commun certains facteurs de risque (comme on vient de l'écrire : tabagisme, abus d'alcool, mauvaise alimentation, sédentarité) liés, pour la plupart, à des comportements malsains.

Aujourd'hui, dans le monde, plus de personnes meurent de surpoids et d'obésité que de malnutrition. L'obésité est favorisée par de mauvaises habitudes alimentaires et un mode de vie malsain. L'éducation à la nutrition et au mode de vie, déjà chez les jeunes, est l'une des meilleures mesures de prévention. L'éducation à la santé est la stratégie la plus rentable qui puisse être mise en œuvre pour contrer l'offre de modèles favorisant l'obésité (aliments riches en calories et à faible valeur nutritionnelle, parfois dangereux en raison de la technologie chimique utilisée : arômes, colorants, conservateurs et des milliers d'autres substances autorisées possibles). Le manque de réglementation et d'information encourage l'abus d'aliments de mauvaise qualité et favorise indirectement les coûts des soins de santé tels que les produits pharmaceutiques et les traitements.

Des campagnes d'éducation alimentaire devraient être promues dans les écoles dans le but de :

- réduire la consommation de boissons gazeuses, sucrées et qui agissent sur le système nerveux ;
- réduire la consommation d'aliments frits et riches en calories (produits sucrés préemballés) ;
- encourager la consommation de fruits et d'aliments peu transformés ;
- réduire la consommation de viande (par exemple, ne pas consommer de sous-produits animaux un jour par semaine) ;
- promouvoir les produits alimentaires locaux ;
- réduire l'utilisation des emballages ;
- encourager une vie moins sédentaire et en plein air ;
- améliorer la capacité à comprendre les messages écrits sur les étiquettes des produits alimentaires ;
- assurer une meilleure connaissance des impacts négatifs générés par la production alimentaire (par exemple, l'eau virtuelle, l'utilisation de pesticides) ;
- améliorer la connaissance des méthodes de production et de transformation des aliments (chacun devrait avoir visité au moins une fois dans sa vie des élevages intensifs et des abattoirs : cette connaissance directe inciterait probablement à diminuer la consommation de denrées alimentaires d'origine animale).

Cultiver les connaissances sur la nutrition, la production alimentaire et, en général, l'éducation à la santé peut réduire considérablement les impacts environnementaux mais aussi les problèmes de santé (par exemple, l'obésité et le surpoids). Avec l'éco-information, nous rendons visible ce qui nous entoure mais reste invisible tant que nous continuons à l'ignorer.

La plupart des comportements qui favorisent les maladies évitables sont facilement modifiables de manière positive, mais aussi de manière négative. Souvent, le contexte économique, social et environnemental dans lequel les gens vivent et travaillent incite à des comportements négatifs, c'est-à-dire des comportements qui encouragent des habitudes néfastes. Certaines catégories de la société profitent de l'existence de ces problèmes, et une petite partie de la société en tire de riches bénéfices. La majorité est blessée, mais les actions collectives d'autodéfense qui devraient en résulter sont totalement inadéquates. L'incohérence et l'inadéquation des stratégies qui pourraient être planifiées et mises en œuvre pour réduire les problèmes générés par quatre facteurs seulement sont très évidentes.

La lutte contre le tabagisme ou le surpoids chez les jeunes apporte certainement plus de bénéfices économiques que l'inaction. Pourtant, nous n'agissons pas comme nous le devrions et le pourrions. C'est l'un des paradoxes de notre époque. Les intérêts privés de quelques-uns l'emportent sur le principe de la sauvegarde de la communauté. Les règles économiques dictent que les avantages doivent être privatisés et que les problèmes et les coûts qui en résultent doivent être répartis sur la communauté d'une manière aveugle, non durable et non conforme à l'éthique.

PESTICIDES ET CANCER

Plusieurs études épidémiologiques qui ont tenté de démontrer l'association de 43 maladies, que l'on peut regrouper en six grands groupes, avec l'exposition aux pesticides ont enregistré diverses corrélations. En particulier, des associations entre l'exposition aux pesticides et la maladie ont été enregistrées pour la cancérogénicité, la neurotoxicité, les problèmes de reproduction, les problèmes métaboliques, la toxicité pulmonaire et les problèmes de développement.⁴⁹¹ Parmi les maladies les plus étudiées associées à l'exposition aux pesticides figurent les cancers et les effets neurotoxiques. Les tumeurs pour lesquelles les preuves sont les plus significatives sont celles du cerveau (chlorpyrifos, bufenacarb, paraquat, coumaphos, métribuzine), de la prostate, du sein, de l'intestin (colorectal), du pancréas et du poumon. Les insecticides sont la classe de pesticides la plus fréquemment associée au cancer.

Des effets cancérogènes ont été rapportés pour plusieurs molécules lors de tests en laboratoire sur des animaux, comme certains insecticides organochlorés (aldrine, chlordane, DDT, dieldrine) et certains solvants utilisés dans la préparation des formulations. Des molécules appartenant à différents groupes (acide phénoxyacétique (herbicides), organochlorés, organophosphorés) ont été associées aux lymphomes non hodgkiniens.¹²⁵⁴ Certaines leucémies et autres cancers sont plus fréquemment signalés chez les utilisateurs de pesticides.¹²⁵⁴

Des études menées dans les années 1990 ont montré qu'au moins 18% des insecticides et la plupart des fongicides utilisés aux États-Unis sont potentiellement cancérogènes.⁵⁰² Les pesticides peuvent favoriser le cancer de plusieurs façons : ils peuvent endommager l'ADN (par exemple, fragmentation, modifications chromosomiques, mutations) ou réduire la capacité à réparer les dommages causés à l'ADN, ils peuvent provoquer un dysfonctionnement mitochondrial, ils peuvent modifier l'expression des gènes ou le phénotype sans changer la séquence d'ADN (modifications épigénétiques).⁴⁸⁷ De faibles doses de pesticides sur le long terme favorisent des lésions du code génétique (ADN) contribuant à des cancers (poumon, prostate et système hématopoïétique) ou des maladies du système nerveux.⁴⁸⁷ L'exposition aux pesticides peut augmenter de manière statistiquement significative l'incidence des cancers suivants : tumeurs cérébrales de l'adulte et de l'enfant, cancers de l'œsophage, de l'estomac, du foie, des os, de la prostate, du sein, des ovaires, du poumon, de la thyroïde et du col de l'utérus.

⁴⁹¹, 500, 528

Certaines substances actives susceptibles d'être impliquées dans l'augmentation de l'incidence du cancer sont : l'aldrine, le chlordane, l'heptachlore, le lindane, la cyanazine (interdite ou non approuvée par l'Union européenne), le mancozèbe, le glyphosate, les pyréthroides, le chlorpyrifos.^{500, 507} Pour certaines molécules, comme le glyphosate (herbicide) et le chlorpyrifos (insecticide organophosphoré), il existe une suspicion fondée qu'elles peuvent favoriser le cancer en générant des dysfonctionnements dans les mitochondries.⁴⁷⁷ Le stress oxydatif est l'un des problèmes résultant du mauvais fonctionnement des mitochondries.

Dans la production agricole, les opérateurs qui distribuent les pesticides peuvent être exposés pendant plus de 10 ans mais aussi pendant 30 ans à des doses élevées et sont donc des sentinelles des risques éventuels. L'absence d'enregistrement des maladies dans ce groupe de population constitue une perte d'informations essentielles pour améliorer la gestion des risques et la prévention.

L'exposition professionnelle des applicateurs ou des travailleurs dans les industries de fabrication de certains pesticides (aldrine, azinphos, carbaryl, chlordécone, coumaphos, DDT, diazinon, dichlone, fonofos, lindane, malathion, manèbe, bromure de méthyle, simazine, terbufos, herbicides à base de triazine, zirame) a été associée à une probabilité accrue d'enregistrer un cancer de la prostate.⁴⁹¹ Le malathion et le diazinon sont classés par le CIRC comme cancérogènes probables (catégorie 2A comme le glyphosate).⁵⁰⁷ Les agricultrices qui ont utilisé des organophosphates sont plus susceptibles de développer un cancer du sein. La concentration d'insecticides organochlorés (par exemple le DDT et ses métabolites comme le DDE) dans le sang et les tissus adipeux a également été corrélée positivement avec une augmentation significative du cancer du sein, qui est la tumeur maligne la plus importante chez les femmes.⁴⁹¹

L'utilisation professionnelle de certains pesticides (acétochlore, terbufos, dicamba, métolachlore, diazinon, chlorpyrifos pendiméthaline) a été liée au cancer du poumon. L'utilisation professionnelle de l'alachlore, du malathion et de l'atrazine a été associée au cancer de la thyroïde. L'utilisation de l'acétochlore, du manèbe, du parathion et du carbaryl a été liée au cancer de la peau.⁴⁹¹

L'exposition des agriculteurs aux pesticides a été associée à une probabilité accrue d'enregistrer certains cancers, comme dans le cas des molécules suivantes :alachlore, aldicarbe, carbaryl, chlorpyrifos, diazinon, dicamba, S-éthyl-N,N-dipropylthiocarbamate, imazethapyr, métolachlore, pendiméthaline, perméthrine, trifluraline.¹¹⁵⁶ Dans certains cas, les preuves épidémiologiques ne sont pas concluantes, mais des études toxicologiques chez l'animal confirment des risques probables d'augmentation de l'incidence des tumeurs pour les molécules :alachlore, carbaryl, métolachlore, pendiméthaline, perméthrine et trifluraline. Certains cancers sont soupçonnés d'être associés à l'exposition à des molécules particulières :¹¹⁵⁶

- le cancer du poumon pour le chlorpyrifos, le diazinon, le dicamba, la dieldrine, le métolachlore et la pendiméthaline ;
- le cancer du côlon pour l'aldicarbe, le dicamba et la trifluraline ;
- le cancer du rectum pour le chlorpyrifos, le chlordane, la pendiméthaline et le toxaphène ;
- les leucémies pour le chlorpyrifos, le diazinon et le fonofos ;
- le mélanome pour le carbaryl et le toxaphène ;
- la tumeur cérébrale due au chlorpyrifos ;
- le cancer de la prostate pour le fonofos et le méthylbromide.

Sur 32 pesticides analysés dans 28 études épidémiologiques, 12 ont été associés à un risque accru d'au moins un type de cancer.

Le terme de lymphome folliculaire englobe un groupe de formes tumorales (présentant des caractéristiques non hodgkiniennes) des lymphocytes B matures.⁵⁴⁹ Ces tumeurs résultent

de mutations génétiques ou d'une translocation entre les chromosomes 14 et 18. L'exposition professionnelle aux pesticides augmente la probabilité d'enregistrer ces tumeurs. La translocation entre le chromosome 14 et le chromosome 18 a été enregistrée chez des agriculteurs français et est liée aux lymphomes folliculaires.⁵²⁰ Malgré les problèmes que cela pose, les translocations, comme toutes les mutations, jouent un rôle important dans l'évolution. Il existe deux grands types de translocation : intra-chromosomique, c'est-à-dire à l'intérieur d'un même chromosome (nous en avons 23 paires, la moitié provenant du père et l'autre de la mère), ou inter-chromosomique, c'est-à-dire entre deux chromosomes différents (une personne sur cinq cents peut être translocatrice).⁵⁴⁷ Les chromosomes semblent se briser et se réunir assez souvent lors de la formation des spermatozoïdes et des ovules, et dans certains cas, des problèmes s'ensuivent. Ces mutations se produisent dans la plupart des cas sans que l'on puisse les prévenir.⁵⁴⁸ Une translocation connue est celle qui affecte le chromosome 21, ce qui génère une forte probabilité de syndrome de Down. Les autres troubles associés aux translocations sont le cancer et l'infertilité masculine et féminine.⁵⁴⁷

Vivre à proximité de champs cultivés (à moins d'un kilomètre) où des pesticides sont utilisés augmente la probabilité d'enregistrer des tumeurs chez les enfants. C'est le constat fait en Espagne, où les cancers de l'enfant sont la première cause de décès par maladie chez les enfants (âgés de 1 à 14 ans).¹¹⁵⁷ Les cancers les plus importants chez les enfants associés à la vie à proximité de champs traités sont les leucémies, suivies des tumeurs du système nerveux central et des lymphomes.

Plusieurs données confirment que le fait de vivre à proximité de zones agricoles où des pesticides sont utilisés augmente la probabilité d'enregistrer certains types de cancer chez les enfants de moins de 14 ans (par exemple, leucémie et cancer du système nerveux central).¹¹⁶⁴ Dans cette étude, on a mesuré des différences dans les fréquences de certains cancers qui se sont avérées être influencées par le fait de vivre près de champs de soja plutôt que de champs d'avoine ou de combinaisons de différentes cultures.

Des études montrent que l'exposition des pères aux pesticides avant la conception augmente la probabilité de tumeurs cérébrales chez leurs enfants.^{491, 500} L'exposition des mères aux pesticides augmente la probabilité que leurs enfants développent une leucémie.⁴⁹¹ L'exposition professionnelle à certains pesticides (dichlorvos, famphur, méthoxychlor, diazinon et pyréthroides) a également été associée à une augmentation des leucémies chez les adultes.

L'exposition des femmes pendant la grossesse à l'insecticide organochloré DDT expose le fœtus à cette molécule cancérigène. L'exposition *in utero* au DDT augmente la probabilité de cancer du sein chez les femmes après 50 ans.⁴¹⁰ Cette étude est le résultat d'une étude de 53 ans portant sur 9.300 filles de mères exposées dans les années 1960 (et 354 filles non exposées servant de témoins). Le DDT est un perturbateur endocrinien et l'exposition des femmes à cette molécule pendant la vie fœtale prédit un risque de cancer du sein multiplié par quatre. Il existe une fenêtre de temps pendant la vie fœtale où le corps féminin est sensible à l'exposition aux perturbateurs endocriniens (le DDT altère la fonction œstrogénique) et les conséquences se mesurent des décennies plus tard (cancer du sein). L'exposition prénatale à des niveaux moyens ou élevés de DDT a également été associée à une augmentation de l'apparition de l'hypertension chez les femmes après l'âge de 50 ans.⁵⁰⁸ À cet égard, il convient de rappeler qu'aux États-Unis et en Afrique du Sud, plus de 20% de la population souffre d'hypertension, tandis qu'en Allemagne et en Espagne, ce chiffre dépasse les 50%.⁵⁰⁸

Il a été démontré que le glyphosate est génotoxique pour les cellules humaines et celles d'autres mammifères.⁴⁹² Un autre herbicide, l'atrazine, induit le cancer du sein et de la prostate chez les animaux (en laboratoire).³⁰⁹

L'herbicide glyphosate induit l'apoptose (mort cellulaire programmée) et la nécrose, et est un promoteur probable des lymphomes non hodgkiniens.^{500, 523, 526} Le glyphosate inhibe la prolifération et la différenciation des cellules humaines (par exemple en adipocytes).⁵²⁶ Les

cellules humaines exposées à la formulation à base de glyphosate (tous les composants du mélange), à des doses inférieures à celles autorisées comme résidus dans les denrées alimentaires et les aliments pour animaux, sont tuées dans les 24 heures : le mélange de formulation stimule l'apoptose des cellules traitées.⁵²³ L'élément intéressant démontré par ce travail est que les dommages cellulaires ne sont pas proportionnels à la concentration de glyphosate mais dépendent des adjuvants. C'est-à-dire que la toxicité cellulaire est générée dans une plus grande mesure par les autres composants du mélange, autres que l'ingrédient actif.⁵²³ Des dommages cellulaires graves pourraient être générés en présence de résidus de glyphosate considérés comme acceptables dans les aliments et être favorisés par des molécules considérées comme inertes ou inoffensives.

L'apoptose est la mort cellulaire programmée : l'acaricide amitraz, également utilisé par les apiculteurs, peut induire l'apoptose cellulaire.^{482, 550} Contrairement à la nécrose, qui est une forme de mort cellulaire résultant d'un stress aigu ou d'un traumatisme cellulaire, l'apoptose s'effectue de manière ordonnée et est régulée par des gènes, elle nécessite une consommation d'énergie et, au cours du cycle de vie de l'organisme, entraîne un avantage ; c'est pourquoi elle est parfois qualifiée de mort altruiste. Pour donner un exemple, au cours du développement, l'embryon humain présente des ébauches de mains et de pieds " palmés " : pour que les doigts se différencient, il faut que les cellules qui constituent les membranes interdigitales meurent.⁵⁵⁰

L'apoptose peut également se produire lorsqu'une cellule est endommagée au-delà de sa capacité à se réparer ou parce qu'elle est infectée par un virus. Les processus défectueux d'apoptose affectent de nombreuses maladies. Une activité excessive de mort programmée peut entraîner des troubles de la perte cellulaire (par exemple, dans certaines maladies neurodégénératives), tandis qu'une apoptose déficiente peut conduire à une croissance cellulaire incontrôlée (mécanismes sous-jacents aux néoplasmes). Comprendre le processus par lequel une cellule s'autodétruit pourrait permettre de prolonger sa vie ou d'accélérer sa mort, un objectif convoité pour le traitement de plusieurs maladies humaines.

Les informations dont nous disposons, bien que partielles et incomplètes, sont suffisantes pour tirer la sonnette d'alarme. C'est pourquoi nous devrions limiter l'utilisation de molécules dont les effets nocifs sont avérés, comme le cancer chez les animaux de laboratoire, même lorsqu'il n'y a pas de preuve confirmée chez l'homme (par exemple, cancérogénicité claire chez les animaux pour le parathion et le malathion).⁵⁰⁷ Les effets aux expositions professionnelles sont également un indicateur important qui devrait conduire à l'application du principe de précaution. En conclusion, de nombreuses études montrent une corrélation entre l'exposition et une probabilité accrue de certains types de cancer. L'application du principe de précaution pourrait éviter des coûts insoutenables et des problèmes de santé.

LE RECENSEMENT DES CANCERS

Les différents systèmes de surveillance des causes du cancer souffrent de l'incapacité à connaître rétrospectivement les déclencheurs auxquels on a été exposé il y a des années. Il est donc très difficile d'identifier les produits chimiques responsables. C'est également la raison pour laquelle les rapports officiels attribuent une infime partie de tous les cancers enregistrés à la pollution environnementale : 2% aux États-Unis en 2012.⁵⁷²

Une autre indication de l'insuffisance des informations est la classification officielle des substances cancérigènes par les organisations internationales. Parmi les dizaines de milliers de molécules potentiellement cancérigènes auxquelles nous sommes exposés tout au long de notre vie, seules 120 ont été identifiées par le Centre international du cancer comme étant définitivement cancérigènes pour l'homme (bien que pour des milliers de substances, il existe au moins une suspicion validée par la recherche scientifique et/ou les informations

épidémiologiques). Cette agence a été fondée en 1965, elle a donc réussi à identifier 120 substances cancérigènes en plus de 50 ans, soit un peu plus de deux substances par an.

Le caractère incomplet des informations dont nous disposons est également mis en évidence par le fait que l'enregistrement des cancers ne se fait avec une certaine efficacité que dans certaines zones géographiques. Par exemple, le réseau des registres italiens du cancer (AIRTUM ou Association italienne des registres du cancer) couvre environ 70% de la population italienne, de sorte que près d'un tiers est exclu.⁵⁷⁷

Les activités préventives, dans les différentes zones géographiques, sont menées avec une intensité et une énergie différentes : en Italie, il y a un écart entre le Nord et le Sud, puisque dans le Nord les diagnostics systématiques sont plus actifs.⁵⁷² Pour donner un autre exemple de l'incomplétude des informations dont nous disposons, nous rapportons le cas du mésothéliome résultant de l'exposition à l'amiante : aucune donnée ISTAT n'est disponible sur les décès par mésothéliome malin en Italie (2019), alors qu'il serait responsable de 4% des décès oncologiques (en Italie, il y a environ 5.615 personnes ayant reçu un diagnostic antérieur de mésothéliome).⁵⁷² En Italie, 6.000 décès liés à l'amiante ont été enregistrés en 2017, mais en raison des longs temps de latence, les décès devraient atteindre un pic vers 2030.⁵⁸² Alors qu'en Amérique, selon l'Association des maladies liées à l'amiante, des millions de personnes meurent chaque année de maladies liées à l'amiante. L'histoire n'enseigne pas et se répète malheureusement : de nombreux pays utilisent encore l'amiante.

Les informations épidémiologiques sur les risques liés à l'exposition professionnelle à des substances particulières (agriculteurs ou apiculteurs, par exemple) et sur l'association éventuelle entre cause et effet sont souvent insuffisantes et fragmentaires. L'effet cocktail existe malheureusement aussi pour les molécules cancérigènes, et les effets additifs et synergiques sont difficiles à étudier.

Dans l'analyse de l'incidence du cancer, il n'y a souvent aucune estimation des cas moins graves, qui échappent au système de classement et de catalogage. Pour certains cancers importants (prostate, rein, thyroïde, mélanome, lymphome), peu de facteurs de risque sont identifiés. D'autres faiblesses sont les différences dans la capacité à diagnostiquer et à enregistrer une tumeur dans les différents territoires, ce qui entraîne une incapacité à déterminer la cause du décès dans de nombreux cas. Toutefois, l'évolution de la mortalité globale, même dans les cas où les causes sont inconnues, doit nous alerter.

Dans le dernier rapport disponible (au moment de la rédaction de ce paragraphe) sur l'incidence du cancer en Italie (2019), les mots pesticides, insecticides, fongicides ou néonicotinoïdes n'existent pas parmi les facteurs de risque de cancer.⁵⁷² Les herbicides sont mentionnés parmi les facteurs de risque des sarcomes des tissus mous, qui sont des cancers rares puisqu'ils ont une incidence de 5 cas pour 100.000 habitants par an et ne représentent pas plus de 1% des cancers (il s'agit d'herbicides à structure phénoxy-acétique ou chloro-phénol avec leurs contaminants tels que les dioxines). Le fait d'être agriculteur et de manipuler des produits chimiques est mentionné comme un risque professionnel pour un type de mélanome : ce n'est pas suffisant.

Parmi les facteurs de risque, la pollution atmosphérique, dont les effets cancérigènes sont reconnus, n'est mentionnée que pour le cancer du poumon. Pourtant, alors que dans les pays industrialisés, on compte environ 3.000 décès par cancer par an et par million d'habitants dus à la pollution atmosphérique, en Italie, les décès dus à la pollution atmosphérique sont estimés à environ 1.500 par million d'habitants : la moitié.^{196, 572} Une étude systématique menée dans 188 pays, couvrant la période 1990-2013, rapporte que la pollution atmosphérique génère un nombre de décès équivalent à celui généré par le tabagisme, ainsi qu'un nombre équivalent d'années vécues avec un handicap (on estime qu'il y a plus d'un milliard de fumeurs dans le monde et, en Italie, probablement une personne sur quatre fume).^{572, 575, 576}

Le concept de pollution environnementale comme cause des maladies cancéreuses est mentionné dans le paragraphe consacré aux *causes environnementales du cancer* : moins de 4

pages sur un total de 388 lui sont superficiellement consacrées (AIRTum Database, 2019).⁵⁷² Pourtant, le document reconnaît l'augmentation du risque d'apparition du cancer du poumon pour les augmentations de la concentration atmosphérique de poussières fines (de 22% pour chaque 10 µg/m³ de PM₁₀, et de 18% pour les augmentations de 10 µg/m³ de PM_{2,5}, qui sont les poussières les plus fines : 2,5 millièmes de millimètre de diamètre). Parmi les facteurs de risque de certains cancers (par exemple : sein, utérus et prostate), le rôle des hormones (œstrogènes et androgènes) est mentionné, et les cancers d'origine endocrinienne (testicule, ovaire, sein, thyroïde, prostate) sont abordés, mais aucune référence n'est faite aux perturbateurs endocriniens (pesticides, bisphénol et des centaines d'autres substances) ; les perturbateurs endocriniens sont mentionnés comme une cause possible de l'augmentation des cancers dans la population vivant à proximité de sites contaminés à assainir. Il convient d'accorder beaucoup plus d'attention aux problèmes de santé causés par la pollution, comme la pollution chimique (eau et aliments) ou la pollution atmosphérique, et aux risques professionnels.

CONTAMINATIONS MULTIPLES DÈS LES PREMIERS STADES DE LA VIE

Les pesticides tuent et rendent malades les humains en synergie avec des centaines d'autres xénobiotiques : des centaines de substances toxiques produites par les activités humaines se retrouvent dans notre organisme, par exemple dans le sang et l'urine, y compris les pesticides.³¹¹ Une étude menée en Europe a recherché 101 produits chimiques dangereux dans l'urine et le sang, et en a trouvé 76, avec une moyenne de 37 produits différents par échantillon.³¹⁰ Ces substances peuvent également être trouvées dans les cordons ombilicaux, ce qui indique une exposition plus précoce et donc beaucoup plus dangereuse.³¹² Des métabolites de pesticides très dangereux, tels que le diazinon et le chlorpyrifos, peuvent être trouvés dans 95% et 100% respectivement des échantillons des premières matières fécales produites par les nourrissons (méconium) : ce sont des substances neurotoxiques.³¹³

Jusqu'à 10 pesticides différents peuvent être trouvés dans le cordon ombilical en même temps que les 20 molécules recherchées (chez les nourrissons chinois des zones rurales). La présence des substances actives dans le cordon ombilical a été associée à un poids réduit à la naissance (vinclozoline, un fongicide, et acétochlore, un herbicide).¹²⁵⁶ L'exposition aux organophosphates a eu le même effet chez les nouveau-nés. Ces études démontrent l'existence d'une exposition dangereuse du fœtus.

La recherche de molécules toxiques dans le cordon ombilical de 230 nouveau-nés et dans le sang de leurs mères vivant à New York a donné les résultats suivants : 22 des 29 pesticides recherchés ont été trouvés, dont les insecticides organophosphorés chlorpyrifos et diazinon (aux Etats-Unis, l'EPA a estimé que 75% du diazinon et 50% du chlorpyrifos étaient utilisés en milieu urbain), les carbamates bendiocarb et 2-isopropoxyphénol (métabolite du propoxur), les fongicides dichloran, phtalimide (métabolite du folpet et du captan) et tétrahydrophthalimide (métabolite du captan et du captafol).³¹⁷ Les insecticides néonicotinoïdes (acétamipride, clothianidine, dinotéfurane, flonicamide, imidaclopride, nitenpyram, thiaclopride et thiaméthoxame) se retrouvent dans le sang et l'urine.

L'exposition à de multiples substances toxiques et persistantes génère sans aucun doute des effets synergiques, des additifs et des interactions dangereuses, surtout si l'exposition a lieu tôt dans la vie, comme l'indique la découverte de traces de plus de 200 substances dangereuses, dont des pesticides, dans le cordon ombilical.⁸³⁵

EFFETS DE SYNERGIE

Nous sommes potentiellement exposés à plus de 129 millions de substances organiques et inorganiques, auxquelles s'ajoutent au moins 4.000 nouvelles substances par an. Ces molécules comprennent au moins 6.400 pesticides (dont au moins 700 matières actives autorisées en Europe en 2017 et des centaines d'additifs ajoutés pour améliorer l'action des matières actives).^{443, 446} Le nombre de produits chimiques dérivés des activités humaines augmente de façon exponentielle : 15% par an au cours des dix dernières années.⁴⁴³ Au moins 150 millions de tonnes de produits chimiques sont produites chaque année en Europe : grand nombre de ces molécules altèrent des fonctions importantes pour les êtres vivants à des doses de l'ordre du millième de gramme ou moins. Pour la grande majorité de ces molécules, nous ne disposons pas d'informations suffisantes sur leur sécurité.

L'exposition à des mélanges de composés nocifs tels que les pesticides et des dizaines de milliers d'autres molécules produit sans aucun doute des effets néfastes, dont certains sont amplifiés par une exposition simultanée tout au long de la vie. Plusieurs études confirment cette hypothèse : deux herbicides (procymidone et vinclozoline) et un médicament prescrit pour traiter le cancer de la prostate (flutamide), qui n'ont individuellement aucun effet perturbateur endocrinien, agissent ensemble et, en interférant avec le fonctionnement de l'hormone mâle testostérone, génèrent des effets alarmants chez les animaux de laboratoire.³²³ C'est-à-dire que de très petites doses, auxquelles il n'y a pas d'effets individuellement, génèrent en combinaison des changements dangereux. Cette recherche démontre l'existence d'effets additifs et/ou multiplicatifs. Des effets synergiques (additifs et/ou multiplicatifs) sur le système immunitaire, le système nerveux et le système endocrinien sont enregistrés chez des animaux de laboratoire ingérant de l'eau contenant de l'aldicarbe, de l'atrazine et des nitrates aux concentrations autorisées par la législation.³²⁴ L'ingestion simultanée de ces molécules génère des effets qui ne seraient pas enregistrés autrement.

Aux États-Unis, les Centers for Disease Control and Prevention (CDC) ont résumé des résultats très alarmants dans un rapport de 2004.³²¹ Ce document présente les résultats de la recherche de substances toxiques dans l'organisme de 9.282 personnes. Au total, 116 substances ont été trouvées dans le sang et l'urine, dont 34 pesticides. Un métabolite de l'insecticide chlorpyrifos est trouvé dans 93% des échantillons testés et le métabolite du DDT dans 99% des personnes [des niveaux élevés du métabolite du DDT (p,p-DDE) chez les mères ont été associés à un poids inférieur à la naissance et à des problèmes de lactation]. 18 pesticides sont trouvés dans au moins 50% des échantillons (dont le 2,4-D) et 100% des échantillons (sang et/ou urine) contiennent au moins trois pesticides. Les enfants âgés de 6 à 11 ans sont exposés à des doses supérieures à celles considérées comme acceptables pour le chlorpyrifos et le méthyl-parathion.³²¹ En 2004, date de publication de ces résultats, 1.200 ingrédients actifs étaient enregistrés aux États-Unis et commercialisés dans plus de 16.000 produits et formulations commerciales.

Les sirènes retentissent depuis plus de 20 ans : des données publiées en 2001 ont confirmé la présence de pesticides dans l'urine de 102 enfants, âgés de 3 à 13 ans.³¹⁸ Les carbamates (et composés apparentés), l'atrazine, le malathion, le chlorpyrifos (et composés apparentés) étaient présents dans 93% des échantillons d'urine.

Une étude qui a testé 214 substances en a trouvé 102 dans le sang et l'urine, dont des biphényles polychlorés, des dioxines, des pesticides, des composés de mercure et d'arsenic.⁸⁷⁴

Des recherches menées en France et publiées en 2010 ont révélé un fait très inquiétant : les enfants ingèrent par l'alimentation au moins 81 molécules nocives en une seule journée, dont 36 pesticides (dont 18 sont classés comme cancérigènes possibles et 14 comme perturbateurs endocriniens).³²² 47 des substances nocives ingérées quotidiennement sont suspectées d'être cancérigènes et 37 d'être des perturbateurs endocriniens (28 substances sont classées comme

cancérogènes probables). Il n'est pas étonnant qu'en France, un homme sur deux et une femme sur trois soient confrontés à un cancer au cours de leur vie (comme en Italie).

Comme nous l'avons déjà mentionné, les interactions entre différents pesticides et d'autres molécules dans les formulations peuvent être additives ou multiplicatives.⁴⁹⁷ L'étude et l'estimation de ces effets sont compliquées et, surtout, très coûteuses. Dans certains cas, heureusement, des informations utiles sont disponibles. Par exemple, l'exposition aux insecticides organophosphorés peut renforcer l'exposition simultanée aux insecticides pyréthroïdes et aux herbicides (triazines).⁴⁹⁷ Le synergisme entre les insecticides pyréthroïdes et les carbamates est également connu. Les effets œstrogéniques de l'exposition simultanée aux insecticides organo-phosphorés et organochlorés s'additionnent. En outre, les interactions entre les pesticides et d'autres substances xénobiotiques doivent être prises en compte. Nous sommes certainement exposés à des mélanges dangereux, car les contrôles effectués en Italie ont révélé la présence de pesticides dans 75% de 629 échantillons de fruits et 47% de 467 échantillons de légumes. Les pesticides les plus fréquemment trouvés (parmi ceux recherchés) dans les légumes sont, par ordre décroissant : boscalid, propamocarb, chlorantraniliprole, difenoconazole, azoxystrobine, cyhalothrine, lambda, fluopyram, thiamethoxam, cyprodinil, dimethomorph, chlorpropham, imidacloprid, pyraclostrobin et acetamiprid.⁴⁹⁶ Dans les fruits, les pesticides suivants ont été trouvés le plus fréquemment et par ordre décroissant : boscalid, etofenprox, captan, chlorantraniliprole, tebuconazole, acetamiprid, fluopyram, pyraclostrobin, fludioxonil, indoxacarb, imazalil, thiachloprid, spinosyn a, chlorpyrifos, triflumuron. 24% des échantillons de légumes et 58% des échantillons de fruits issus de l'agriculture conventionnelle présentent plusieurs résidus en même temps (voire plus de 5).⁴⁹⁶ Les types de légumes dans lesquels plus de 50% des échantillons présentaient des résidus étaient les pommes, les poires, les oranges, les fraises, les raisins, les pêches, les carottes, les pommes de terre et les épinards. Des résidus de pesticides ont également été trouvés dans 5% de 40 échantillons de légumes issus de l'agriculture biologique et dans 2% de 48 échantillons de fruits issus de l'agriculture biologique.⁴⁹⁶ Bien qu'il soit impossible de rechercher toutes les molécules utilisées en agriculture (et leurs dérivés) et celles qui pourraient contaminer les aliments en raison d'autres polluants, ces moniteurs montrent la présence d'expositions dangereuses. Les données de surveillance des aliments ne permettent pas de mesurer la gravité du problème. Aux États-Unis, pour prendre un autre exemple, le contrôle des aliments recherchait généralement moins de 40 ingrédients actifs parmi plus de 600 autorisés.⁵⁰² La recherche analytique en laboratoire est coûteuse, il est impossible de rechercher tous les polluants possibles et leurs dérivés, les méthodes d'analyse ne permettent pas toujours de mesurer des concentrations très faibles mais néanmoins capables de déclencher des effets indésirables, de nombreuses substances dangereuses sont inconnues ou très difficiles à trouver. Il faut donc encourager la collecte d'informations en amont telles que les quantités produites, commercialisées, utilisées et distribuées dans l'environnement sur chaque territoire.

INCIDENTS

On dénombre au moins 26 millions de cas d'empoisonnement aux pesticides par an, dont au moins 300.000 aux États-Unis (il s'agit d'une estimation optimiste).¹²⁴³ L'Organisation mondiale de la santé enregistre au moins 280.000 décès par an dus à des intoxications par des pesticides, tels que les organo-phosphorés et les organo-chlorés, qui sont les pesticides les plus fréquemment mis en cause parmi les causes d'empoisonnement.^{280, 500} La réduction de l'utilisation des pesticides ne peut avoir que des effets bénéfiques.

Parmi les effets secondaires de la production de pesticides figurent les accidents. On se souvient de l'accident de l'usine d'insecticides de Bhopal, en Inde (en 1984), qui a fait 3.000 morts dans

les jours qui ont suivi la catastrophe. Au cours des années suivantes, entre 20.000 et 30.000 personnes sont mortes, au moins 250.000 ont été blessées et intoxiquées, et au moins 10.000 personnes ont été handicapées à vie (les chiffres sont incertains).^{175, 280, 500}

Dans le monde, les pesticides sont à l'origine d'au moins 3 millions de personnes intoxiquées hospitalisées, de 750.000 malades chroniques et d'au moins 25 millions de travailleurs agricoles victimes d'intoxications involontaires chaque année (soit plus de 250 millions de personnes sur 10 ans).^{443, 502} En outre, on dénombre chaque année entre un et deux millions de cas d'empoisonnement involontaire dus à des incidents liés à la lutte antiparasitaire.

Dans le monde, en 2004, on estime qu'au moins 346.000 personnes sont mortes à la suite d'une ingestion, d'une inhalation ou d'une contamination par contact non intentionnelle de produits chimiques, dont 19% d'enfants (30.000 enfants sont morts à la suite d'un empoisonnement sur le lieu de travail) ; 71% de ces décès par empoisonnement non intentionnel ont été classés comme facilement évitables.⁵²⁸ Les substances préoccupantes sont l'amiante, qui, en 2004, a causé au moins 107.000 décès dus à divers cancers tels que le mésothéliome, et le plomb, qui a été à l'origine de 143.000 décès et a provoqué un retard mental et des maladies cardiovasculaires.⁵²⁸ Au total, en 2004, au moins 526.000 personnes sont mortes dans le monde à la suite d'un empoisonnement intentionnel ou involontaire par des produits chimiques. La même année, en 2004, cette recherche estime qu'au moins 1.152.000 personnes sont mortes de la pollution atmosphérique urbaine et qu'au moins 872.000 personnes sont mortes de la pollution intérieure générée par l'utilisation du feu par les ménages pour produire de la chaleur et cuisiner (rappelons qu'au moins la moitié de la population mondiale utilise des combustibles solides, comme le bois, à la maison).⁵²⁸ Globalement, on estime qu'environ 4,9 millions de personnes sont mortes des suites d'une contamination chimique dans le monde en 2004 (8,3% de tous les décès de cette année-là). Il s'agit certainement de sous-estimations, mais elles donnent une dimension à certains problèmes importants tels que ceux générés par les pesticides, l'amiante et le plomb chez les enfants. De nombreux effets néfastes sur la santé sont sous-estimés ou non détectés, notamment ceux qui nécessitent des systèmes de surveillance et de diagnostic coûteux (par exemple, la mesure des changements de comportement, des déficiences cognitives et des effets généralement sublétaux tels que ceux sur la reproduction).

Autre fait dramatique, les pesticides sont utilisés pour se suicider : au moins 186.000 cas ont été enregistrés dans le monde en 2002.⁵²⁸

Dans les années 2000, aux États-Unis, on estime qu'il y avait au moins 300.000 cas d'empoisonnement par an.⁵⁰² Aux États-Unis, le fait d'être employé dans l'agriculture est 34 fois plus susceptible d'enregistrer des maladies dues aux pesticides (18,2 maladies pour 100.000 travailleurs agricoles) que le fait d'occuper un autre emploi (0,53 maladie due aux pesticides pour 100.000 travailleurs).^{517, 581} Aux États-Unis, les pesticides constituent la neuvième catégorie de substances les plus courantes dans l'enregistrement des problèmes de santé par les centres antipoison, et 45% de toutes les intoxications par les pesticides se produisent chez les enfants.^{500, 516}

Heureusement, les activités de certaines organisations signalent l'existence d'une nouvelle prise de conscience des effets des pesticides sur la santé humaine. On remarquera en particulier le site français "*Victimes des pesticides*", qui contient le témoignage de centaines d'agriculteurs et de citoyens ayant connu des problèmes de santé causés par les pesticides.²⁷² En France, les victimes des pesticides se sont organisées en association.²⁷³ Des campagnes sont promues sur des sites web dans différents territoires afin de recueillir les signatures nécessaires pour abolir l'utilisation des pesticides. Il s'agit de mouvements populaires visant à s'opposer à l'utilisation des pesticides et à la limiter. Des témoignages sont également recueillis par des organisations dans d'autres pays.²⁷⁴ Des témoignages très tristes sur les histoires des victimes des pesticides sont recueillis dans des documentaires et des publications.²⁸⁰ L'attention accrue portée aux effets négatifs des pesticides est susceptible d'inciter les décideurs à accélérer les

processus qui doivent conduire à une utilisation moindre et plus prudente de milliers de substances toxiques pour l'homme et l'environnement.

QUELQUES LIMITES DE L'ÉVALUATION TOXICOLOGIQUE PRÉVENTIVE

Certaines des limites de l'évaluation des risques toxicologiques pour la santé humaine sont les suivantes :

- Les informations sur les tests effectués par les entreprises qui commercialisent les pesticides sont secrètes, car elles sont protégées par des règles commerciales.¹²⁹⁵

- Il est presque impossible de tester les effets synergiques et additifs des différentes substances auxquelles nous sommes exposés en même temps et tout au long de notre vie avant la commercialisation.

- Il n'est pas facile d'extrapoler des conclusions sur les risques pour la santé à partir des résultats d'expériences sur les animaux et il y a un risque de sous-estimer les problèmes.

- La toxicité des pesticides est influencée par plusieurs facteurs, dont les caractéristiques génétiques individuelles. Certains gènes (PON1 et Cytochrome P450) expriment des protéines qui peuvent augmenter ou diminuer certains risques.¹²⁵⁴

- L'évaluation toxicologique est réalisée sur des doses uniques d'un seul ingrédient actif et se réfère à un adulte de 70 kg. Les enfants ne peuvent pas être considérés comme des adultes légers et il existe un risque de sous-estimer des effets qui sont beaucoup plus prononcés chez les femmes, les personnes âgées ou les malades. De nombreux polluants peuvent être retrouvés chez les enfants (par exemple dans l'urine) à des concentrations plus élevées que celles mesurées chez les mères.¹²⁵⁵

- Certains effets tels que ceux sur le comportement, les déficits cognitifs, les dysfonctionnements endocriniens, la reproduction et le système immunitaire sont difficiles à évaluer.

- Les autres composants du mélange de pesticides commerciaux ne sont pas pris en compte et les métabolites ne sont pas évalués, en partie parce qu'ils peuvent ne pas être connus, notamment lors des étapes préliminaires. Il en va de même pour les produits de dégradation. Par exemple, les adjuvants de la préparation contenant l'herbicide glyphosate se sont révélés plus toxiques que l'herbicide lui-même dans des études cellulaires.^{523, 551} La comparaison de la toxicité de 9 principes actifs et de leurs formulations commerciales (c'est-à-dire des mélanges des principes actifs avec d'autres substances) dans trois lignées cellulaires humaines (cellules placentaires, hépatiques et embryonnaires humaines) a montré une augmentation de la toxicité des mélanges.⁵²⁵ Trois herbicides ont été testés : glyphosate, isoproturon, fluroxypyr ; trois insecticides : pirimicarbe, acétamipiride et imidaclopride ; trois fongicides : prochloraz, tébuconazole et époxiconazole. Les fongicides étaient les plus toxiques pour les cellules et présentaient des effets indésirables à des concentrations 300 à 600 fois inférieures à celles recommandées pour l'usage agricole. En termes de toxicité pour les cellules, les fongicides étaient suivis des herbicides puis des insecticides. Parmi les herbicides et les insecticides testés, l'ingrédient actif, le glyphosate, s'est révélé être le plus toxique. Huit des neuf formulations commerciales testées étaient plus toxiques que les ingrédients actifs : la formulation de glyphosate, appelée *Roundup*, était 125 fois plus toxique ; la formulation de tébuconazole était 1.056 fois plus toxique.⁵²⁵ Dans le cas de la formulation commerciale de l'herbicide glyphosate (*Roundap*), un adjuvant éthoxylé était beaucoup plus toxique que le glyphosate. Il convient de rappeler que l'introduction dans l'agriculture de plantes génétiquement modifiées résistantes au glyphosate a fait de ce dernier l'un des pesticides les plus vendus dans le monde et, par conséquent, également l'un des plus susceptibles de contaminer les sols, l'eau et les aliments.⁵⁵²

Dans cette étude, la seule formulation qui ne s'est pas révélée plus toxique que l'ingrédient actif était celle contenant de l'isoproturon.⁵²⁵

En conclusion, l'évaluation toxicologique des substances actives individuelles ne reflète pas la réalité. Les adjuvants et autres substances présents dans les mélanges commercialisés peuvent accroître considérablement la toxicité des substances actives.^{523, 551} Les adjuvants sont souvent considérés à tort comme inoffensifs et leur toxicité n'est généralement pas mesurée à l'aide des méthodes utilisées pour les substances actives. Ils ne sont pas non plus déclarés comme ingrédients sur l'étiquette. Ainsi, l'estimation de la dose acceptable, par exemple dans les aliments, ne permet pas d'évaluer les risques liés aux adjuvants, qui peuvent être plus toxiques que la substance active et présents en plus grandes quantités. Il convient également d'évaluer si les métabolites et les produits de dégradation sont plus toxiques que les produits de départ. Les produits de dégradation peuvent être générés dans l'environnement par hydrolyse, qui peut se produire dans le sol, ou par photodégradation par la lumière.⁶⁷⁷ Les métabolites sont ceux produits dans les organismes cibles ou dans les micro-organismes du sol, par des réactions de déméthylation, d'hydroxylation et de conjugaison avec les acides aminés. Des exemples de métabolites plus toxiques que les produits de départ sont ceux du fongicide prothioconazole (le métabolite le plus toxique est appelé prothioconazole-dexthio), le métabolite du fipronil (généré par photodégradation), l'ométhoate qui est dérivé du diméthoate et le dérivé (sulfoxyde) des N-méthylcarbamates.⁶⁷⁷ Il convient de rappeler que, théoriquement, les substances telles que les métabolites ou les produits de dégradation des pesticides, qui peuvent être trouvées dans les aliments à des concentrations supérieures à 0,01 mg/kg, nécessitent une évaluation toxicologique. L'évaluation de la sécurité est importante mais souvent difficile, voire impossible. Dans de nombreux cas, les métabolites et les produits de dégradation ne sont pas connus lorsque les nouvelles molécules sont mises sur le marché. Parfois, la toxicité des molécules (comme la génotoxicité, dont les effets n'ont pas de seuil de sécurité) peut être prédite à partir de la structure chimique, car elle peut être comparée à celle de composés connus.

L'évaluation toxicologique considère presque automatiquement que les ingrédients actifs sont la partie la plus dangereuse du produit commercial, alors que dans de nombreux cas, ce n'est pas le cas. Il convient de souligner que les adjuvants peuvent également prolonger la résistance de la substance active dans l'environnement, retarder sa dégradation et faciliter son absorption par les êtres vivants. Les adjuvants déclarés sur l'étiquette comprennent le naphte, le xylène, la 1-méthyl-2-pyrrolidinone, le N,N-diméthyl-décanamide : tous ont enregistré des effets dangereux.⁵²⁵

En raison des difficultés inhérentes à l'évaluation toxicologique, qui sont aggravées par les mécanismes bureaucratiques et influencées par les grands intérêts économiques, il arrive que les agences chargées de protéger l'intérêt public fournissent des évaluations discordantes. C'est le cas de l'herbicide glyphosate, qui a été classé comme *cancérogène probable* (catégorie 2A) par le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC, 2015) tandis que, quelques mois plus tard, l'Agence européenne de sécurité des aliments (EFSA, 2015) a conclu qu'*il est peu probable que le glyphosate présente un danger cancérogène pour l'homme*". Les différentes conclusions sont également une conséquence du fait que l'EFSA et le CIRC ont utilisé des publications et des résultats scientifiques différents comme référence. L'EFSA s'est probablement concentrée sur les travaux toxicologiques réalisés par les entreprises agrochimiques, qui, entre autres, ne sont pas publics et ne peuvent donc pas être consultés.⁵⁰⁰ Il convient de rappeler que le glyphosate induit des dommages à l'ADN et aux chromosomes chez les mammifères, et que ses métabolites peuvent être trouvés dans le sang et l'urine des personnes qui y sont exposées. L'Agence américaine pour l'environnement (EPA) a également conclu en 2016 que le glyphosate *n'est pas un cancérogène probable pour l'homme* sur la base d'expositions non professionnelles.⁷¹² Ces différences majeures dans les évaluations et les conclusions mettent en évidence les problèmes et les faiblesses critiques de la science et des

autorités sanitaires du monde entier. Cependant, il existe des preuves que le glyphosate peut favoriser le cancer, qu'il est bioaccumulatif et qu'il a plusieurs effets négatifs sur la biosphère.⁷¹² Malheureusement, les grands intérêts économiques et le manque de transparence dans les processus décisionnels (par exemple, sur les conflits d'intérêts entre les évaluateurs et sur la littérature scientifique examinée) constituent un énorme obstacle à la démocratie et à la sauvegarde de l'intérêt public. En général, la communauté scientifique et les décideurs ont sous-estimé les problèmes de santé causés par les pesticides et, plus encore, les dommages causés à la biosphère. Le système actuel de règles et de pratiques qui ont fait leurs preuves depuis au moins 50 ans exclut la possibilité pour un territoire de se défendre contre l'hégémonie de ces grandes entreprises chimiques. Les habitants d'un territoire, par exemple d'une Département, d'une Région mais aussi d'un Etat, sont confrontés à des difficultés bureaucratiques, administratives et juridiques considérées comme insurmontables pour limiter l'utilisation d'arsenaux chimiques et de stratégies qui portent atteinte à la souveraineté et à la sécurité alimentaire. Les intérêts privés sont passés maîtres dans l'art de dresser des barrières insurmontables à ceux qui voudraient assurer une meilleure protection de la santé et de l'environnement. Le droit de se défendre contre des lois et des réglementations économiques injustes et insoutenables a été mis à mal depuis longtemps.

Un aspect qui pourrait être exploré est l'état de santé des apiculteurs utilisant des pesticides (par exemple, des acaricides et des fongicides). Un type d'étude épidémiologique qui pourrait être mis en œuvre est l'étude prospective : à partir d'un moment donné, une population exposée à un certain facteur (par exemple, les apiculteurs exposés aux pesticides qu'ils utilisent sur leurs abeilles) est suivie, même pendant des décennies, afin d'enregistrer les habitudes de vie et les problèmes de santé. Les résultats doivent être comparés à ceux de groupes témoins, c'est-à-dire de sujets non exposés aux mêmes facteurs mais présentant des conditions de santé, de vie et d'environnement similaires. Les études épidémiologiques sont un outil très exigeant et coûteux, mais elles constituent souvent le meilleur système disponible pour mesurer les tendances et fournir des preuves.

La méthodologie actuelle d'analyse des risques pour notre santé présente de nombreuses limites car elle se fonde presque exclusivement sur des études à court terme qui ne tiennent pas compte des faibles concentrations d'exposition à des mélanges très différents au cours d'une vie. Malheureusement, les informations générées par les études scientifiques sur la toxicité des substances individuelles ne sont pas suffisantes pour fournir une assurance.

LE PRINCIPE DE PRÉCAUTION

Les connaissances dont nous disposons confirment que l'exposition aux pesticides aggrave notre santé. Nous n'avons aucun doute. Nous pouvons discuter de l'intensité des problèmes, mais pas des effets et de l'orientation générale. De nombreuses études confirment le danger pour les animaux mais la projection de ces résultats sur l'homme peut conduire à sous-estimer ou, pire, à ignorer des conséquences qui peuvent être très graves.

Le progrès a produit une épidémie de maladies chroniques évitables telles que le cancer : la prudence est la stratégie la plus audacieuse qui puisse être mise en œuvre. Un changement de paradigme dans la gestion de la santé publique est nécessaire de toute urgence. La crise sanitaire s'inscrit dans le cadre plus large de la crise environnementale mondiale. Il est urgent d'agir car nous n'avons pas besoin de nouveaux signaux d'alerte, ceux que nous refusons d'accepter sont déjà très inquiétants. En 2018, pour la première fois depuis des décennies et pour la troisième année consécutive, l'espérance de vie moyenne à la naissance aux États-Unis a diminué.³³³ Si ce chiffre est validé, il confirmera la grave crise environnementale et sanitaire. C'est l'un des nombreux signes évidents que les règles économiques et financières ne peuvent négliger. Les

pratiques politiques et économiques négligent la santé humaine et environnementale au profit de profits à court terme. Les entreprises ignorent, sous-estiment ou dissimulent les coûts sociaux et environnementaux de leurs activités, les externalisant vers la communauté dans son ensemble et, en particulier, vers les générations futures. Les coûts évités en évitant les maladies, les catastrophes environnementales ou les dommages au système de production alimentaire ne sont pas pris en compte avec la pertinence nécessaire. L'application du principe de précaution permettrait d'économiser des ressources économiques gigantesques et la vie de beaucoup d'entre nous. Le principe de précaution ne s'applique pas aux dangers déjà identifiés, mais aux dangers potentiels, dont nous n'avons pas encore une connaissance certaine. Lorsqu'il existe un risque de dommages graves ou irréversibles, l'absence de certitude scientifique absolue ne devrait pas être une raison pour reporter les mesures appropriées visant à prévenir la dégradation de l'environnement et les atteintes à la santé.³³⁵ Invoquer le principe de précaution est une décision qui doit être prise lorsque les informations scientifiques sont insuffisantes, non concluantes ou incertaines et que, en même temps, il existe des indications selon lesquelles les effets possibles sur l'environnement et la santé des personnes, des animaux et des plantes peuvent être potentiellement dangereux et incompatibles avec le niveau de protection choisi. La logique du principe de précaution est combattue par les intérêts commerciaux, car elle réduirait la liberté d'action. Souvent, les mesures préventives et correctives ne sont pas prises, même lorsqu'il n'y a plus de doute. Pour changer de paradigme, il est nécessaire de diffuser l'information car le savoir peut aider à la révolution nécessaire.

DES SOLUTIONS INEFFICACES

Pour tenter de répondre aux demandes des citoyens, des solutions inefficaces et/ou impossibles sont parfois proposées. Par exemple, il est proposé comme objectif à atteindre d'ici 2020 en Europe (le 7^e programme-cadre) que seuls les pesticides qui n'ont pas d'effets négatifs sur l'homme et qui n'ont pas d'effets inacceptables sur l'environnement soient utilisés.²⁷⁶ En outre, il est indiqué qu'il s'agit d'une bonne intention de les utiliser de manière durable. Ces objectifs sont inatteignables car le but de l'utilisation, par exemple, des insecticides est d'exterminer les insectes et le mécanisme d'action par lequel ils agissent est identique, même sur les organismes non ciblés. Des effets liés au mécanisme d'action principal ou d'autres actions secondaires, qui peuvent être encore plus nocifs, sont également régulièrement enregistrés chez les êtres vivants non ciblés, y compris l'homme. Atteindre l'objectif d'exterminer les insectes sans générer d'effets secondaires est donc une utopie pour l'instant. L'agro-industrie et les politiciens sous-estiment le fait que, tôt ou tard, les risques liés à l'agriculture chimique affectent ceux qui les provoquent. D'autres solutions inefficaces consistent à contrer les effets des insecticides toxiques, tels que les néonicotinoïdes distribués dans les semences, en proposant de se limiter à la modification des semoirs.⁶⁷⁸ Entre autres, les fabricants d'imidaclopride affirment qu'il n'y a aucun risque pour les insectes lors des semis, car la contamination de l'environnement est négligeable ; un autre affirme que les risques n'existent que si la semeuse est défectueuse.^{700, 869} Malheureusement, plusieurs aspects sont sous-estimés : ces molécules sont persistantes et peuvent se déplacer dans la biosphère ; des tentatives superficielles sont faites pour minimiser et détourner l'attention en se concentrant sur des accidents exceptionnels.

LA CONVENTION DE STOCKHOLM

Au niveau international, de nombreuses actions ont été proposées pour réduire les risques sanitaires, notamment dans le cadre de la Convention de Stockholm sur les polluants organiques persistants, établie lors d'une conférence à Stockholm en 2001.^{390, 404} Cet accord international vise à éliminer et à réduire l'utilisation de certaines substances nocives pour la santé humaine et l'environnement, appelées *polluants organiques persistants* (POP). Il s'agit de composés chimiques aux propriétés toxiques qui, en raison de leur faible dégradabilité, restent longtemps dans l'environnement. Dans la Convention de Stockholm, des mesures restrictives sont suggérées pour au moins 15 pesticides, les dioxines et les biphényles polychlorés. La Convention a été adoptée en 2001, est entrée en vigueur en 2004 et couvre les substances suivantes :

- Les pesticides tels que l'aldrine (insecticide organochloré), le chlordane (insecticide à base de chlore), le chlordécone (insecticide), le dichloro-diphényl-trichloroéthane (DDT), la dieldrine, l'endrine, l'heptachlore (insecticide organochloré), le mirex (insecticide organochloré), le toxaphène (c'est un mélange réactionnel d'environ 200 composés organiques, obtenu par chloration du camphène jusqu'à une teneur en chlore de 67-69% en poids), l'hexachlorophène (un désinfectant et un bactéricide, également utilisé dans des formulations à usage externe comme les savons et pour la désinfection des muqueuses orales comme les dentifrices) et l'hexachlorocyclohexane (lindane).^{394, 396, 401, 1281}
- Retardateurs de flamme : pentabromodiphénol et hexabromodiphényle.^{391, 393}
- Les polychlorobiphényles (PCB) utilisés comme isolants thermiques et électriques ou comme lubrifiants.⁴⁰²
- Les polychlorodibenzo-p-dioxines (PCDD) et les polychlorodibenzofuranes (PCDF), plus communément appelés dioxines, se forment lors de la combustion et sont générés par certains procédés thermiques et industriels en tant que sous-produits indésirables et inévitables [par exemple, la production de cuivre, de fer, d'acier, d'aluminium et de zinc, la production de plastiques (PVC) et de composés chimiques, tels que certains herbicides à base de dérivés chlorés].^{403, 405} Les boues issues de la purification de l'eau (qui peuvent être utilisées comme engrais) et le compost (qui contient des déchets indésirables mais inévitables et des feuilles qui ont bioaccumulé des dioxines de l'atmosphère) peuvent contenir des dioxines. Les caractéristiques physico-chimiques des dioxines sont à l'origine de leur comportement dans les matrices environnementales et biologiques, et de leur capacité à se transférer et à s'accumuler dans les organismes vivants. Ce sont des composés extrêmement stables, résistants à la chaleur, à la dégradation chimique et biologique, et très liposolubles. Ils sont facilement bioaccumulés dans la chaîne alimentaire, leur concentration augmentant à chaque étape. Le principal mécanisme d'entrée des dioxines dans la chaîne alimentaire terrestre est le dépôt atmosphérique sur les plantes et à la surface des sols, qui entraîne l'ingestion par les animaux de fourrage et de sol contaminés (par les herbivores qui paissent). Les animaux accumulent ces substances dans les tissus adipeux du corps, les rendant disponibles pour la consommation humaine à travers des produits tels que le lait et la viande. Ils se caractérisent par une longue persistance dans l'organisme humain : 4-16 ans. La persistance de certaines dioxines dans le sol peut être élevée. Par exemple, la dioxine connue sous le nom de TCDD (ou 2,3,7,8-tétrachlorodibenzo-p-dioxine), peut diviser par deux sa concentration dans les couches superficielles du sol en 9 à 15 ans, alors que la demi-vie estimée pour les couches plus profondes est de 25 à 100 ans.

Par la suite, il a été proposé de restreindre également la fabrication d'autres molécules telles que l'insecticide endosulfan, l'insecticide méthoxychlor, le retardateur de flamme dechlorane plus, les plastifiants, les additifs pour le travail des métaux et les retardateurs de flamme tels que les paraffines chlorées, l'acide perfluorooctane sulfonique et ses sels, et le fluorure de perfluorooctane sulfonyle (utilisés comme insecticides, dans les fluides hydrauliques pour l'aviation, la photographie et l'imagerie, les vêtements, etc.).^{405, 406, 407}

Cette convention, qui vise à limiter certains dommages environnementaux et sanitaires, a été signée par 181 pays, dont les États membres de l'Union européenne. L'Italie, qui l'a signée en 2001, ne l'a, au 9 août 2019, ni ratifiée ni mise en pratique : c'est le seul État européen signataire à avoir ignoré la Convention, qui n'a pas non plus été ratifiée par la Malaisie, Israël, l'Inde et les États-Unis, tandis que la Chine et la Confédération russe n'acceptent des limitations que pour certaines des molécules réglementées par la Convention.^{403, 404, 409}

Bien que ce type d'accord vise à limiter ou à interdire la production de très peu des centaines de substances pour lesquelles il existe suffisamment d'informations sur les dangers pour justifier des interdictions, il ne parvient pas à susciter une application généralisée. En fait, des molécules comme le DDT continuent d'être fabriquées ou importées, ou sont utilisées pour produire des molécules chimiquement similaires comme le dicofol, qui est produit à partir du DDT et a pratiquement la même structure chimique : il est importé et commercialisé en Italie (2004).⁴⁰⁸ En Italie, on trouve encore du DDT dans l'eau potable et les eaux de surface, ce qui laisse soupçonner une utilisation illégale. Le DDT est certainement utilisé en grande quantité en Asie et en Afrique.⁴¹⁰

LE DÉFI DES COÛTS DES SOINS DE SANTÉ : LES DÉFICIENCES INTELLECTUELLES

L'estimation des coûts des dommages sanitaires causés par l'utilisation des pesticides est une tâche difficile et peut conduire à des sous-estimations très contestables. Selon une étude publiée en 2005, les pesticides aux États-Unis ont généré des coûts d'au moins 12 milliards de dollars en dommages environnementaux et en problèmes de santé. À cette époque, environ 600 pesticides différents étaient utilisés aux États-Unis, pour un coût d'environ 10 milliards de dollars.^{502, 537} Selon cette estimation, les coûts les plus importants générés par l'utilisation massive de pesticides sont ceux générés par divers problèmes (par ordre décroissant) :

- Les dommages pour la santé humaine.
- L'émergence d'organismes résistants aux pesticides.
- La réduction des rendements. Par exemple, de 1945 à 2000, l'utilisation d'insecticides (organochlorés, organophosphorés et carbamates) a été multipliée par au moins 10, mais les dégâts causés par les insectes sont passés de 7 à 13%.
- L'augmentation de la mortalité chez les oiseaux. Cela est connu depuis un certain temps ; par exemple, dans les années 1990, on estimait que le diazinon tuait entre un et deux millions d'oiseaux chaque année. Selon certaines estimations, les pesticides aux États-Unis tuent entre 0,25 et 9 oiseaux par hectare et par an. À ce problème s'ajoutent la réduction des sources de nourriture (par exemple, les insectes), les effets sur la reproduction (par exemple, les insecticides organochlorés à des doses sublétales).
- La contamination des eaux souterraines.

Dans 24 pays européens, 13 matières actives utilisées dans la viticulture, l'arboriculture et les cultures maraîchères génèrent une perte d'environ 2.000 années de vie par an, ce qui pourrait représenter 78 millions d'euros par an.⁴⁹⁴ Une année de vie perdue, dans cette estimation, a été évaluée à 39.000 euros ; cette hypothèse simpliste de monétisation de la vie ouvrirait une longue réflexion sur ce que notre santé peut valoir en termes monétaires. Cette approche repose sur

l'hypothèse que la vie et la mort ont également une valeur monétaire et constituent donc une monnaie d'échange possible.

Afin de pouvoir estimer les effets générés par l'utilisation de pesticides, il serait très utile de connaître les substances et les produits commercialisés et utilisés dans les territoires, avec des détails pour chaque culture individuelle et pour chaque hectare ou fraction d'hectare. Malheureusement, ces informations sont insuffisantes ou absentes.

Plusieurs méthodes ont été conçues pour tenter d'établir les bénéfices obtenus par les différentes stratégies de prévention. Par exemple, la prévention de la présence de polluants tels que le plomb dans le sang des enfants génère des bénéfices différents en fonction des concentrations seuils qui sont fixées (en termes d'estimations économiques). Les coûts générés par la pollution par le plomb comprennent la réduction du QI et les coûts de santé liés aux tests et aux traitements (pour au moins 10% des enfants français, comme ceux dont la concentration sanguine dépasse 100 µg/L). Les personnes ayant un QI réduit peuvent avoir besoin d'une formation spéciale et générer des coûts d'éducation accrus, et seront moins productives au travail. L'exposition au plomb a également été associée à une probabilité accrue d'activité criminelle au cours de la vie. Une étude réalisée en France estime que si les concentrations maximales de plomb dans le sang des enfants âgés de zéro à six ans restent inférieures à 15 µg/L, les avantages économiques et sociaux s'élèvent à au moins 22 milliards d'euros (4,7 millions d'enfants ont été enregistrés en France en 2008).⁵⁰³ En France, 50% des enfants ont une concentration de plomb dans le sang supérieure à 15 µg/L. Les coûts de santé directs résultant de la présence de plomb dans le sang des enfants sont estimés à environ 300 millions d'euros. Selon cette estimation, les coûts de santé sont légèrement supérieurs aux coûts qui pourraient être engagés pour réduire l'exposition au plomb dans la maison. Globalement, en France, on estime que la réduction du QI induite par le plomb engendre des coûts de plus de 20 milliards d'euros par an (il s'agit d'une sous-estimation car elle ne prend en compte que les effets neurotoxiques et n'évalue pas les dommages environnementaux).³²⁶ Les auteurs de cette étude considèrent que chez les enfants, des concentrations sanguines de plomb comprises entre 24 µg/L et 100 µg/L entraînent une diminution du QI de 3,9 points pour chaque milliardième de gramme par litre (µg/L) d'augmentation, alors qu'il diminue d'un point entre 15 et 24 µg/L (également pour les millièmes de gramme par litre d'augmentation).⁵⁰³

Aux États-Unis, les dommages causés par les effets neurotoxiques de l'exposition au plomb atmosphérique issu de la combustion du pétrole sont bien documentés pour la génération née entre 1960 et 1980. L'exposition nocive au plomb a touché des millions d'enfants, entraînant une réduction significative du QI et des coûts estimés entre 110 et 319 milliards de dollars par an.³²⁷ On estime que l'introduction de l'essence sans plomb dans les années 1980 a généré un bénéfice économique de plus de 200 milliards de dollars par an.³²⁶ Il est probable que pour chaque dollar investi dans la réduction de l'exposition au plomb, des bénéfices de 17 à 220 dollars sont produits (cette réduction des coûts des soins de santé peut être comparable ou supérieure aux bénéfices produits par certains vaccins).³²⁶

Ces résultats confirment l'idée souvent sous-estimée que, si l'on tient compte des coûts sanitaires et sociaux, tant directs qu'indirects, la prévention et l'assainissement visant à réduire l'exposition aux polluants sont également rentables sur le plan économique : suppression du plomb dans les peintures, remplacement des conduites d'eau potable et réduction des émissions des industries de transformation des métaux. Les coûts environnementaux tels que les effets du plomb sur la flore et la faune ne sont souvent pas correctement pris en compte. Il convient de rappeler que les effets du saturnisme étaient déjà connus des Romains et qu'une épidémie touchant les enfants en Australie a été bien décrite il y a 100 ans.³²⁷

Pour une augmentation de la concentration de composés du mercure (méthyl-mercure) de 6 µg/g dans les cheveux, on a estimé une réduction du QI (d'environ 3 points).³²⁷ En Europe, le méthylmercure entraîne une perte d'au moins 600.000 points de QI ; cette réduction se traduit

par des coûts de traitement, d'éducation et de réduction de la productivité du travail estimés à au moins 10 milliards d'euros chaque année.³²⁶ Pour chaque point de QI perdu en raison de l'exposition prénatale au mercure, il y a une perte économique de 17.000 euros (s'il est possible de quantifier aussi précisément la valeur de la santé perdue).⁵⁰⁰ D'autres molécules qui ont été signalées comme pouvant causer des troubles cognitifs chez les enfants (par exemple, un QI réduit) sont les polychlorobiphényles (pris à travers le lait maternel), les insecticides organophosphorés et le fluorure.³²⁷

En Europe, l'exposition prénatale aux pesticides organophosphorés entraîne une perte annuelle de 13 millions de points de QI et 59.300 cas de déficience intellectuelle.⁵⁰¹ Globalement, les perturbateurs endocriniens pourraient générer des coûts équivalant à un sixième de tous les coûts attribués aux troubles cérébraux enregistrés en Europe. On estime que les handicaps nerveux résultant de l'altération du QI causée par les perturbateurs endocriniens ont une valeur économique d'environ 146 milliards d'euros. Là aussi, on estime une valeur de l'intelligence qui pourrait être source de nombreuses critiques et d'une réflexion intéressante (2.400 euros par nouveau handicap : 146 milliards/59.300 nouveaux cas par an). Ces considérations constituent un point de départ intéressant pour réfléchir aux évaluations possibles effectuées au niveau politique, aux moments de la prise de décision ; on peut percevoir combien une évaluation basée sur le critère de la monétisation de la santé ou de l'intelligence peut être superficielle et fragile. La même étude estime qu'en Europe, les perturbateurs endocriniens génèrent entre 126 et 631 nouveaux cas d'autisme par an et entre 19.400 et 31.200 nouveaux cas de troubles de l'attention avec hyperactivité.⁵⁰¹

En Europe, l'exposition aux phtalates (présents dans les plastiques tels que ceux utilisés pour fabriquer les bouteilles d'eau potable) favorise l'infertilité masculine, entraînant plus de 600.000 nouvelles demandes de procréation assistée chaque année et provoquant plus de 53.000 nouveaux cas d'obésité.⁵⁰¹ Il s'agit d'estimations (les auteurs calculent une fourchette de probabilité de 40 à 69%), elles peuvent donc s'avérer fausses. Une divulgation systématique aurait probablement pour effet positif d'encourager une réduction de l'utilisation de ces substances. Croire en des règles économiques arides et simplistes est dangereux : on risque de chosifier la santé et l'environnement en acceptant l'achat et la vente comme une pratique politiquement correcte.

Selon un autre critère de monétisation de la santé, aux États-Unis, pour chaque dollar dépensé en pesticides, au moins deux dollars sont dépensés en coûts externalisés tels que la santé publique.⁵⁰⁰ Au Brésil, on estime que les coûts générés par les atteintes à la santé des agriculteurs cultivant des haricots et du maïs s'élèvent à 25% de la valeur des recettes.⁵⁰¹

Ces tentatives d'évaluation économique sont sans doute sous-estimées et ne suffisent pas à donner une idée de la gravité de la situation, mais elles permettent de réfléchir aux critères simplistes et réducteurs utilisés pour arriver systématiquement aux mêmes conclusions, à savoir : les preuves sont insuffisantes pour justifier un changement de cap. Les règles économiques et financières dominent également la santé. La situation est encore plus complexe et sous-estimée en raison de son importance lorsqu'il s'agit d'évaluer les dommages environnementaux.

DONNÉES SUR LES VENTES DE PESTICIDES EN ITALIE ET SURVEILLANCE DANS LES EAUX

Certaines informations sur les pesticides sont résumées ci-dessous, en remarquant que les données sur les ventes vont jusqu'en 2012, tandis que les analyses de l'eau ont été publiées en 2016.^{500, 504, 523, 533, 534, 535, 551, 697}

Pesticides	Tonnes vendues en Italie en 2012 et pourcentage des ventes totales	Pourcentage trouvé dans les eaux de surface en Italie	Pourcentage trouvé dans les eaux souterraines en Italie	Cancérogène ou mutagène possible	Perturbateur endocrinien suspecté	Plus d'informations
2,4-D ou 2,4-Dichlorophénoxyacétone (E)	55,7 (0,4%)	9,9	2,5	X	X	<i>Irritation des voies respiratoires, allergène, altération de la reproduction. Corrélation présumée avec la maladie de Parkinson</i>
Acétamipride (néonicotinoïde, I)	2,32 (0,02%)	11,2	3,2	-	-	<i>Neurotoxique</i>
Atrazine (E), interdit depuis 1992	-	4,1	5,6	-	X	<i>Persistant dans l'environnement et bioaccumulatif. La présence de l'herbicide atrazine dans l'eau potable (aux États-Unis, on le trouve dans 94% des échantillons) a été associée à des malformations congénitales, à une baisse de la fertilité et à des cancers.</i>
Atrazine 2-hydroxy (métabolite de l'atrazine)	-	<u>66,7</u>	<u>33,8</u>	-	-	<i>Persistant dans le sol.</i>
Atrazine déséthyl (métabolite de l'atrazine)	-	5,1	9,9	-	X	-
Atrazine désisopropyl (métabolite de l'atrazine)	-	-	4	-	-	-
Bentazone (E), benzothiadiazine	48,8 (0,37%)	<u>18,7</u>	-	-	-	<i>Domage pour la reproduction.</i>
Boscalid (F), carboxyanilide	37,65 (0,1%)	<u>29,4</u>	<u>5,7</u>	X	X	<i>Persistence dans le sol et l'eau.</i>
Cadusafos (I, N, organophosphoré), retiré dans l'UE depuis 2008	-	<u>40,7</u>	<u>12,1</u>	-	-	<i>Il affecte le développement neurologique. Susceptible d'être lié à un trouble de l'hyperactivité avec déficit de l'attention.</i>
Carbaryl (I, carbamate) retiré depuis 2009, aucun usage autorisé dans l'UE	0,31 (0,002%)	<u>11</u>	<u>2,2</u>	X	X	<i>L'exposition parentale a été liée à des anomalies congénitales. Létal pour les vers de terre à des doses 10 fois inférieures à celles recommandées pour l'usage agricole. Ses métabolites sont plus toxiques que la molécule de départ (ils se forment chez l'homme et dans le sol).</i>

Le carbendazime (bénomyl, F), dont l' utilisation n'est plus autorisée depuis 2003 , est un métabolite du fongicide thiophanate-méthyle qui est soupçonné d'être cancérogène.	-	<u>45,3</u>	<u>12,3</u>	X	X	<i>Persistant dans l'eau. En 2016, l'ARPA Lazio l'a trouvé dans les abricots, les poires, les pommes, les raisins, les kiwis et les pêches.</i>
Chlorpyrifos (I, organophosphorique)	464 (3,45%)	4,3	1,5	X	X	<i>Il affecte le développement neurologique. On soupçonne qu'il soit lié au trouble de l'hyperactivité avec déficit de l'attention et à l'autisme. Pour le système nerveux, ses métabolites peuvent être 3.000 fois plus toxiques que la molécule de départ (par exemple, le chlorpyrifos-oxon).</i>
Chlorpyrifos-méthyle (I, organophosphoré)	7,9 (0,59%)	1	0,3	X	X	<i>Toxique pour les vers de terre et les oiseaux.</i>
Cyproconazole (F, triazoles)	7,74 (0,06%)	11,9	12,3		X	<i>Toxique pour les organismes aquatiques.</i>
Dicamba (E, dérivé de l'acide benzoïque)	43,4 (0,33%)	11,9	2,7	X		<i>Stable dans l'eau.</i>
Dichlorvos (I, organophosphoré), retiré depuis 2008	0,44 (0,003%)	<u>2,1</u>	<u>0,8</u>	X	X	<i>On soupçonne qu'il soit lié au trouble déficitaire de l'attention avec hyperactivité (TDAH).</i>
Diflubenzuron (I, régulateur de croissance, azotorganique)	2,85 (0,02%)	40,9	8,3	-	X	<i>Il est très toxique pour les organismes aquatiques.</i>
Diméthoate (ométhoate, I, organo-phosphorique)	100 (0,75%)	11	0,3	-	X	<i>Il affecte le développement neurologique. Susceptible d'être lié à un trouble de l'hyperactivité avec déficit de l'attention.</i>
Diméthomorphe (F, morpholine)	11,6 (0,38%)	36,6	5,7	-	X	<i>Nuit à l'activité des bactéries dans le sol (par exemple, les bactéries nitrifiantes). Toxique pour les organismes aquatiques.</i>
Dithianon (F, fumigant, thiocyanquinones)	249 (1,85%)	50	7,4	X	-	<i>Toxique pour les poissons.</i>
Diuron (E, phénylurée), retiré depuis 2008	0,01 (<0,001%)	<u>18</u>	<u>2,6</u>	X	X	<i>Dans le sol, il se transforme en 3,4-dichloroaniline, plus toxique et persistant. Il est très toxique</i>

						<i>pour les organismes aquatiques.</i>
Esaflumuron (I), non approuvé dans l'UE et retiré en Italie en 2004.	-	-	<u>20,4</u>	-	-	<i>Persistence dans le sol et l'eau</i>
Fenazaquin (F, quinazoline)	0,0014 (<0,001%)	18,2	17,8	X	-	<i>Il est très toxique pour les organismes aquatiques.</i>
Fluazifop (E, aryloxyphénoxy propionates)	-	66,7	22,4	-	X	--
Fluazifop-butyl (E, aryloxyphénoxy-propionates)	32,74 (0,25%)	14,3	-	-	-	<i>Nocif pour la reproduction. Très toxique pour les organismes aquatiques.</i>
Le glyphosate (E, organo-phosphorique), interdit dans le 2016	1.795 (13,4%)	<u>70,9</u>	<u>5</u>	X	-	<i>Il a été associé à un risque accru de fausses couches, de troubles de la reproduction et de malformations. Il altère la flore intestinale des abeilles, des bovins et des porcs (il a été enregistré comme antibiotique). Dans le sol, il endommage les agents fixateurs d'azote.</i>
AMPA (métabolite du glyphosate, E)	-	<u>70,9</u>	<u>4</u>	-	-	<i>Troubles de la reproduction chez les vers de terre.</i>
Imidaclopride (I, néonicotinoïdes)	30,5 (0,1%)	53,5	10,1	-	-	<i>Il a été associé à l'autisme. Il est neurotoxique pour les oiseaux.</i>
Ioxinil (E, dicarboximide), non approuvé depuis 2016	7 (0,05%)	<u>68,8</u>	<u>21,7</u>	X	X	-
Metalaxyl (F, acylalanine)	16,28 (0,05%)	27,8	5,9	X	-	<i>Toxique pour la reproduction. Dangereux pour les organismes aquatiques.</i>
Metalaxyl M (F, acylalanine)	20,9 (0,16%)	36,5	-	-	-	<i>Toxique pour la reproduction.</i>
Méthomyl (I, carbamate)	2,54 (0,0%2)	29	10,3	X	X	<i>Il a été associé à la maladie de Parkinson. Il est très toxique pour les organismes aquatiques. Il s'agit d'un métabolite de l'herbicide nicosulfuron.</i>
Métolachlore (E, chloroacétamides), retiré depuis 2003	0,88 (0,003%)	<u>38,3</u>	<u>4,3</u>	X	X	<i>Il est transformé en métabolites tout aussi dangereux.</i>
Métolachlore S (E, chloroacétamides)	402 (2,99%)	38,3	10,3	X	-	<i>Très toxique pour les algues. Il endommage la reproduction. Il se transforme en métabolites tout aussi</i>

						<i>dangereux.</i>
Métolachlore ESA (E, chloroacétamides), un métabolite du métolachlore et de l'alachlore. Ce dernier est cancérigène et a été retiré du marché depuis 2006.	40 (1,33%)	55,6	30,3	-	-	<i>Persistant dans le sol et toxique pour les organismes aquatiques.</i>
Nicosulfuron (E, sulfonilurée)	10,24 (0,08%)	18,9	-	-	-	<i>Hautement toxique pour les organismes aquatiques. Se dégrade dans l'eau en méthomyl (insecticide).</i>
Oxadixyl (F, phénylamides), retiré en 2003	0,11 (0,001%)	<u>7,9</u>	<u>10,5</u>	X	-	-
Penconazole (F, triazoles)	15,7 (0,12%)	11,5	3,6	-	X	<i>Dans le sol, les métabolites sont très toxiques pour les vers de terre.</i>
Propamocarbe (F, carbamates)	38,9 (0,3%)	21,6	8,2	X	X	<i>Neurotoxique pour les oiseaux</i>
Propiconazole (F, triazoles)	12 (0,09%)	13	-	-	X	<i>Substance persistante et toxique. Dans le sol, les métabolites sont très toxiques pour les vers de terre.</i>
Propoxur (I, carbamate), retiré depuis 2003	0,003 (<0,001%)	<u>15,5</u>	<u>18</u>	X	X	<i>Il est très toxique pour les mammifères et les abeilles.</i>
Pyrimethanil (F)	18,6 (0,06%)	10,2	6,8	-	X	<i>Très toxique pour les abeilles</i>
Tébuconazole (F, triazoles)	88,9 (0,67%)	28,6	6,1	X	X	<i>Toxique pour les organismes aquatiques. Produit des métabolites toxiques pour les vers de terre.</i>
Thiabendazole (F, benzimidazoles)	0,1 (0,001%)	31	10,6	X	-	<i>Toxique pour la reproduction. Toxique pour les organismes aquatiques.</i>
Thiametoxam (I, néonicotinoïdes)	6,75 (0,05%)	30	10,7	X	-	<i>Neurotoxique pour les oiseaux. Chez les mammifères, il provoque des troubles de la reproduction. Toxique pour les organismes aquatiques.</i>
Thiophanate-méthyle (F, benzimidazoles)	46,75 (0,35%)	-	-	X	-	<i>Endommage les vers de terre. Toxique pour les organismes aquatiques. Les métabolites comprennent le carbendazime.</i>
Thiabendazole (F, benzimidazoles)	0,1 (0,001%)	28,6	10,6	X	X	<i>Très toxique pour les organismes aquatiques.</i>

Légende : E = herbicide ; I = insecticide ; F = fongicide ; N = nématicide.

Ce tableau, bien qu'incomplet, est proposé dans l'intention de mettre en évidence certains aspects critiques :

- 1) Des pesticides non autorisés depuis des années ont été retrouvés en grande quantité dans l'eau.
- 2) Il n'y a pas de corrélation entre les quantités vendues et le pourcentage d'échantillons d'eau positifs. Par exemple, l'acétamipride (insecticide néonicotinoïde) est vendu en petites quantités (0,02% du total des pesticides, soit environ 2 tonnes) mais se retrouve dans plus d'un dixième des eaux de surface testées. Il en va de même pour d'autres pesticides tels que le boscalid, le bentazone, le carbaryl, le diflubenzuron, le diméthomorph, le diuron et le fenazaquin. Cette incohérence renforce le soupçon que les informations sur les quantités vendues sont déficientes et incomplètes.
- 3) Entre différents pesticides, il peut y avoir une différence dans le niveau de toxicité aiguë qui peut varier d'un facteur 100, 1.000 ou plus. Les montants utilisés, s'ils ne sont pas désignés comme des équivalents toxiques, ne permettent pas d'effectuer des comparaisons adéquates. Des pesticides très toxiques, tels que les insecticides néonicotinoïdes, peuvent générer les mêmes effets indésirables à des doses nettement inférieures à celles des insecticides organochlorés.
- 4) Les molécules dérivées (par exemple, les métabolites et les produits de dégradation), qui sont aussi ou plus dangereuses que les produits de départ, peuvent être trouvées en grandes quantités. Les métabolites du glyphosate se retrouvent dans plus de 70% des échantillons d'eau de surface et ceux de l'atrazine dans plus de 66% ; rappelons que ce dernier herbicide est interdit depuis 1992.
- 5) Certaines molécules non autorisées, car considérées comme dangereuses, sont des métabolites possibles de molécules autorisées. Les fongicides carbendazim ou bénomyl ne sont pas autorisés mais sont des métabolites du thiophanate-méthyle, qui est autorisé. Il convient de remarquer que la plupart des métabolites sont inconnus et que les métabolites connus ne sont généralement pas recherchés dans le cadre de la surveillance officielle. Certains métabolites sont également des milliers de fois plus toxiques que les composés de départ et sont plus persistants dans l'environnement. En effet, des molécules interdites parce que dangereuses peuvent, avec cette stratégie chimique, être utilisées sans risque de sanctions.
- 6) Les pesticides enregistrés pour un type d'action produisent des métabolites qui agissent sur d'autres cibles. Par exemple, le penconazole est un fongicide qui, dans le sol, génère des métabolites très toxiques pour les vers de terre ; certains fongicides (par exemple les carbamates comme le propamocarbe) sont neurotoxiques pour les oiseaux. Le méthomyl, qui est enregistré comme insecticide, est également un produit de dégradation de l'herbicide nicosulfuron. Par conséquent, la distribution de l'herbicide a également des effets en tant qu'insecticide.
- 7) Peu d'informations sont disponibles sur les effets sur les organismes non ciblés tels que les organismes aquatiques. À titre d'exemple d'une matière active utilisée en grande quantité, les invertébrés aquatiques sont vulnérables à l'insecticide imidaclopride : certains crustacés (Mysidacea) peuvent être affectés par des concentrations inférieures à 1 µg/L ; les stades larvaires des insectes du groupe des éphémères (genres *Baetis* et *Epeorus*) peuvent être affectés par des concentrations encore plus faibles d'imidaclopride (0,1 µg/L).
- 8) Certains pesticides qui comptent parmi les plus vendus en Italie ne font pas l'objet de recherches dans le cadre de la surveillance de l'eau. Par exemple : le dazomet, dont au moins 204 tonnes ont été vendues (en 2012), génère dans le sol des métabolites très dangereux pour les vers de terre et les organismes aquatiques ; le folpet, qui appartient à

la catégorie des fongicides et fumigants thiophthalmes, dont 316 tonnes ont été vendues, est suspecté d'être cancérigène et très toxique pour les invertébrés aquatiques ; le mancozeb, qui est un fongicide à base de dithiocarbamate, dont 1.307 tonnes ont été vendues, est suspecté d'être cancérigène et perturbateur endocrinien, et est très toxique pour les organismes aquatiques. 307 tonnes et est suspecté d'être un cancérigène et un perturbateur endocrinien, est hautement toxique pour les organismes aquatiques et génère des métabolites tout aussi dangereux.

Les résultats du contrôle des pesticides effectué par les services sanitaires régionaux en Italie montrent que peu de molécules sont recherchées et de manière non spécifique : il n'y a pas d'évaluation préalable des cultures présentes dans la zone et donc des principes actifs les plus utilisés. Le contrôle analytique des produits phytosanitaires dans l'eau pourrait :

- en tenant compte de l'extension des cultures agricoles dominantes dans la région et notamment dans les zones affectant les points de captage ;

- prévoyant l'examen préalable des carnets de terrain (enregistrement obligatoire de l'utilisation d'herbicides, fongicides, insecticides, etc.) des agriculteurs dans les zones d'influence des points d'approvisionnement ;

- prendre en compte les chiffres de vente des produits phytosanitaires ;

- consulter les agronomes pour mieux cibler les recherches à mener ;

avant de planifier le suivi annuel. Il devrait être possible de rechercher un plus grand nombre de principes actifs et de manière sélective, sur la base des informations disponibles, afin d'éviter de gaspiller des ressources telles que celles destinées à la recherche de principes actifs qui ne sont certainement pas utilisés. Il est également nécessaire d'éviter de ne pas rechercher les ingrédients actifs qui sont définitivement utilisés.^{1247, 1248}

- 9) Certains additifs, adjuvants et synergistes peuvent être tout aussi dangereux que les ingrédients actifs avec lesquels ils sont mélangés dans les formulations commerciales. Peu d'informations sont disponibles sur ces molécules. C'est le cas du butoxyde de pipéronyle, qui augmente la toxicité pour les abeilles des ingrédients actifs avec lesquels il est mélangé et est toxique pour les organismes aquatiques ; on le trouve également dans l'huile d'olive et c'est un synergiste suspecté d'être cancérigène. Un autre exemple est celui des adjuvants dans les mélanges commerciaux de glyphosate (herbicide). Les adjuvants sont généralement considérés comme inoffensifs, alors qu'en fait ils peuvent être plus toxiques que l'ingrédient actif. Les études toxicologiques préalables à la commercialisation doivent évaluer la substance active seule, l'ensemble du mélange commercial et les principaux composants de la formulation commerciale en l'absence de la substance active.

Les informations provenant de la surveillance de l'eau présentent de nombreuses limites, car il est impossible de rechercher toutes les substances utilisées, dont beaucoup sont inconnues (par exemple les métabolites), et il s'agit d'une approche très coûteuse. Un enregistrement systématique et en temps utile des substances fabriquées, commercialisées, vendues et utilisées devrait être mis en œuvre afin que nous connaissions les molécules utilisées dans chaque champ agricole et dans d'autres applications (serres, chemins de fer, espaces verts). Le secteur agricole, en Europe et en Italie, bénéficie de nombreux financements publics et d'autres facilités qui devraient être liés à la collecte de certaines informations qui permettraient une planification plus efficace de la surveillance, comme celle de l'eau. En outre, les plans de développement agricole devraient cesser d'inciter à l'utilisation de pesticides, comme c'est le cas pour les traitements obligatoires de certaines cultures (par exemple la vigne).

Le danger des pesticides, tant pour l'environnement (par exemple sur les pollinisateurs) que pour la santé humaine, est estimé à l'aide de modèles qui impliquent une certaine linéarité de la réponse. La principale caractéristique d'un système non linéaire est qu'il ne satisfait pas au principe de superposition des effets. Il n'est donc pas possible pour un système non linéaire de calculer la réponse à une entrée externe donnée par la somme de deux signaux, en calculant la réponse du système à chaque signal séparément, puis en additionnant les résultats. Les réponses peuvent être multiplicatives ou par étapes. Ainsi, l'empoisonnement systématique de la biosphère associé à toutes les autres perturbations d'origine humaine (par exemple, le changement climatique, la déforestation, la réduction de la fertilité des sols, la destruction de la biodiversité, la modification des flux biochimiques d'azote, de phosphore et de carbone, etc.) peut produire des effets encore inconnus et imprévus.

LE RECENSEMENT DE L'UTILISATION DES PESTICIDES : UNE CÉCITÉ ORGANISÉE

Environ 1.400 ingrédients actifs (de pesticides) sont utilisés dans le monde, accompagnés d'un très grand nombre de métabolites, de dérivés de dégradation environnementale, d'adjuvants et de substances qui augmentent leur efficacité et leur dispersion dans l'environnement.¹⁹⁶ En 2016, près de 400.000 tonnes de matières actives de pesticides utilisées principalement en agriculture ont été vendues en Europe.²⁶⁴ Les pays européens qui ont vendu les plus grandes quantités en 2016 sont, par ordre décroissant, l'Espagne, la France, l'Italie, l'Allemagne et la Pologne. Les données statistiques sur les ventes de produits phytosanitaires en Italie ont enregistré les quantités suivantes : 71.613 tonnes en 2010, 59.422 tonnes en 2014 et 63.322 tonnes en 2015. Au cours de la période 2010 - 2015, les fongicides ont représenté la plus grande fraction (environ 60%) des quantités vendues, suivis des herbicides (environ 13%) et des insecticides (entre 9,4% et 11,4%).¹⁹⁴ En même temps, le nombre de substances actives utilisées en Italie est passé de 280 en 2010 à 300 en 2015.

Les données sur la vente de pesticides sont auto-certifiées par les vendeurs et l'enregistrement de leur utilisation par les agriculteurs, bien qu'obligatoire, ne permet pas de recueillir les informations souhaitées. Remarquons que la législation (Règlement CE n° 1107/2009 dans l'Art. n° 65 et l'Art. n° 67) stipule :

*" Les fabricants, fournisseurs, distributeurs, importateurs et exportateurs de produits phytopharmaceutiques conservent pendant au moins cinq ans (délai trop court : les effets sont mesurés même après 30 ans, comme ceux du DDT) les dossiers des produits phytopharmaceutiques qu'ils fabriquent, importent, exportent, stockent ou mettent sur le marché. Les utilisateurs professionnels de PPP conservent, pendant au moins trois ans (une période encore une fois trop courte), des registres sur les PPP qu'ils utilisent, indiquant le nom du PPP, la date et la dose d'application, ainsi que la superficie et la culture sur lesquelles il a été utilisé. Ils mettent les informations pertinentes contenues dans ces registres à la disposition de l'autorité compétente sur demande. Les tiers, tels que l'industrie de l'eau potable, les détaillants ou les résidents, peuvent demander l'accès à ces informations en s'adressant à l'autorité compétente. Les détenteurs d'autorisation fournissent aux autorités compétentes des États membres toutes les données concernant le volume des ventes de produits phytopharmaceutiques, conformément à la législation communautaire relative aux statistiques sur les produits phytopharmaceutiques. "*²⁶⁵

De nombreuses années ont passé et l'obligation légale n'est toujours pas respectée. Les informations qui permettraient un meilleur contrôle et une meilleure prévention ne sont pas collectées et cataloguées. La disponibilité d'internet et des systèmes informatiques permettrait d'enregistrer facilement et rapidement ces informations sous forme électronique. Cependant, la plupart des pays européens ne collectent pas ces informations ou les considèrent comme confidentielles, de sorte que même lorsqu'elles sont collectées, elles sont agrégées, ce qui réduit la qualité des données (par exemple, la quantité d'insecticides vendus dans un pays).²⁶⁶

Il convient de collecter des données sur les ventes, mais aussi des données sur les utilisateurs qui, croisées avec les informations relatives à la surveillance de l'eau et des denrées alimentaires, donneraient une image plus réaliste de la situation (quand et où les différentes substances actives sont utilisées). La transparence et l'accessibilité de l'information ne sont pas garanties et aucune mesure de contrôle particulière n'est prise pour les pesticides les plus dangereux, tels que ceux qui sont persistants, bioaccumulatifs et dont les effets cancérigènes sont avérés.²⁶⁷ Comme aucune information spécifique sur les molécules individuelles n'est collectée, il n'est pas possible de mesurer les augmentations ou les diminutions d'utilisation dans des cultures et des zones spécifiques. Les informations recueillies ne sont pas classées par niveau de danger, et les situations d'atteinte plus graves (par exemple, une eau fortement contaminée) ne sont pas mises en évidence. Ce niveau d'information fait défaut en Europe.²⁷⁶ Il en résulte une difficulté objective à contrôler les comportements illégaux : les autorités nationales ne sont pas en mesure de garantir le respect des réglementations. Le manque d'information et d'enregistrement de ce qui se passe sur le territoire permet une plus grande liberté d'action aux vendeurs et aux utilisateurs. Cette stratégie prévoit en fait un aveuglement organisé. Pour avoir une idée du peu d'informations disponibles au niveau européen, il faut consulter le site web d'Eurostat.²⁷⁹

CHOIX À IMITER

La prise de conscience des dommages causés par l'utilisation des pesticides aux abeilles, mais aussi aux humains et à l'environnement en général, ne suffit pas pour prendre les mesures nécessaires. L'une des solutions les plus simples, déjà adoptée par de nombreux apiculteurs, agriculteurs et des zones géographiques entières, consiste à appliquer les principes de l'agriculture biologique. Ce type de système agricole implique la non-utilisation de pesticides. Certaines communautés ont même décidé par référendum de supprimer les pesticides de leur territoire, comme ce fut le cas de la communauté de Malles, qui compte environ 5.200 habitants dans les Alpes, dans la province de Bolzano. La commune de Malles est située dans une zone du Trentin où sont produites environ la moitié des pommes d'Italie et où 45 kilos de pesticides sont utilisés par hectare et par an. À titre de référence, l'utilisation moyenne de pesticides en Italie se situe entre 5 et 6 kilogrammes par hectare et par an, et la moyenne européenne est d'environ 4 kilogrammes par hectare et par an. Par conséquent, les fruits (66%) et les légumes (40%) contiennent des pesticides.¹⁹⁶

La même décision (interdiction des pesticides sur le territoire) a été prise par l'État du Sikkim en Inde, qui a été récompensé par l'ONU pour avoir été le premier à le faire.¹⁹⁶

La superficialité dans le traitement du problème des pesticides se manifeste de nombreuses façons, y compris dans le secteur de l'agriculture biologique, qui est une tentative insuffisante mais à récompenser d'une agriculture plus durable. Un document de 2018 sur les exigences relatives à l'accréditation des organismes certifiant les produits biologiques parmi les facteurs de risque élevé en raison de la teneur en pesticides énumère (dans le tableau 2) les produits de la ruche et en particulier les apiculteurs ayant plus de 500 ruches.⁷⁷ Le risque de contamination des abeilles par les pesticides utilisés en agriculture est indépendant du nombre de ruches gérées

par l'apiculteur individuel. La probabilité qu'un apiculteur industriel utilise des ingrédients actifs pour traiter les maladies des abeilles est certainement plus élevée.

LUTTER CONTRE LA CONTAMINATION CHIMIQUE ÉVITABLE

Dans les années 1990, des études ont montré qu'il était possible de réduire de plus de 50% l'utilisation de pesticides sans réduire les rendements ni compromettre l'aspect du fruit ou du légume. Une réduction de 50% de l'utilisation des pesticides aurait pu entraîner une très légère augmentation des coûts de production, qui aurait été largement compensée par la réduction des dommages environnementaux et sanitaires.⁵³⁸ La conception d'un système de production alimentaire moins destructeur et capable de fonctionner sans l'aide de pesticides est probablement l'un des points centraux dont dépend la durabilité du système agricole. Le changement nécessaire devra être mis en place progressivement. Parmi les recommandations qui pourraient être suggérées pour sauvegarder les insectes pollinisateurs (et autres), on peut citer les suivantes :

- Interdire la vente de pesticides à usage domestique et ornemental, et dans l'environnement urbain : ils ne doivent jamais être utilisés dans les parcs, les jardins publics et privés, les installations sportives, les réseaux ferroviaires, les bords de route.
- Interdire l'utilisation préventive, c'est-à-dire avant même d'évaluer les seuils économiques d'intervention. La distribution systématique de certaines matières actives, comme les insecticides néonicotinoïdes avec les semences, est une folie. Les pesticides ne doivent pas être utilisés tant que leur besoin urgent n'a pas été confirmé par un service public qualifié.
- Ne pas utiliser de pesticides (par exemple, des insecticides) si les dommages causés (par exemple, sur les fruits) sont principalement cosmétiques.
- Interdire également l'utilisation de fongicides et d'herbicides sur les plantes qui sont attractives pour les pollinisateurs, c'est-à-dire celles qui produisent du pollen et du nectar. La simple interdiction de l'application pendant la floraison (par exemple pour les insecticides) ne suffit pas, surtout pour les molécules qui sont distribuées dans le sol ou avec les graines. Il ne faut pas oublier que de nombreuses molécules persistent dans le sol pendant des années.
- Enregistrer toutes les informations sur la production, la vente et l'utilisation des insecticides de manière plus fiable. Les informations sur les pesticides utilisés dans chaque culture doivent être rendues publiques chaque année.
- Il devrait être obligatoire d'enregistrer tous les incidents tels que l'augmentation de la mortalité animale, les maladies professionnelles et la contamination de l'eau. Des registres doivent être conservés et publiés chaque année.
- Rendre obligatoire la liste des pesticides utilisés sur les étiquettes des produits alimentaires.
- Interdire l'utilisation de pesticides dans les zones d'importance naturaliste et en tout cas dans les zones qui ne sont pas à prédominance agricole.
- Augmenter les sanctions pour l'utilisation illégale de pesticides.
- Encourager les pratiques de culture qui gênent les ennemis des cultures et favorisent les pollinisateurs, comme la création de zones refuges (au moins 10% des surfaces cultivées), ne pas déplacer le sol (par exemple, interdire le labour), alterner les cultures annuelles, faire plusieurs cultures en même temps sur une même parcelle, utiliser des moyens de lutte mécaniques (par exemple, le désherbage).
- Les pesticides ne doivent être achetés que par des utilisateurs enregistrés (correctement informés, inscrits et contrôlés) après avoir reçu des instructions écrites d'un service

public qualifié de protection des végétaux (agronomes et vétérinaires). Des registres des prescriptions doivent être tenus, enregistrés, contrôlés et publiés.

- L'état de santé des producteurs et des utilisateurs de pesticides doit être étroitement surveillé. Les pesticides sont des poisons extrêmement puissants, un arsenal chimique plus dangereux que les armes conventionnelles, et ne devraient donc être vendus et utilisés que par des personnes autorisées, formées et contrôlées, et uniquement lorsque leur utilisation est nécessaire pour le bien public.

Parmi les polluants qui devraient être interdits figurent les "*cosmétiques pour fruits*" tels que le *rouge citrus* (n° 2 ou E 121), utilisé aux États-Unis depuis 1956 pour colorer la peau de certaines oranges (en Floride). En 2019, il a été autorisé à être utilisé dans les oranges de Floride mais a été interdit en Europe car il est considéré comme un cancérigène probable. En Europe, les écorces d'agrumes peuvent être enduites de cires contenant des fongicides tels que le thiabendazole et l'imazalil, qui est également utilisé à la surface des bananes, des légumineuses, des pommes de terre et autres tubercules. Sur les agrumes, dans certains cas, on utilise des cires naturelles, comme la cire d'abeille (E 901), la cire de carnauba (E 903), la gomme-laque (E 904) ou la cire de polyéthylène oxydée (E 914).³¹⁴ L'enrobage extérieur n'améliore pas seulement l'apparence, il scelle également les pores de l'agrumes et ne permet pas au fruit de respirer, ce qui ralentit son métabolisme et prolonge sa durée de conservation. L'Agence américaine de protection de l'environnement (EPA) a classé l'imazalil comme cancérigène probable. Après l'administration d'imazalil à des rats, des adénomes et des adénocarcinomes thyroïdiens ont été observés.³¹⁶ L'EPA et la Commission européenne ont toutes deux estimé qu'il n'y avait pas de risque accru pour les personnes appliquant directement l'imazalil sur les produits agricoles.³¹⁵

La diffusion des produits chimiques dans l'agriculture n'a pas résolu le problème de la faim dans le monde et a rendu impossible pour de nombreux agriculteurs de mener une vie digne. En raison de la diffusion de l'agriculture chimique, les agriculteurs se sont appauvris et sont devenus plus dépendants d'autres acteurs : les industries des pesticides et des semences. Les pesticides devront être limités aux utilisations extraordinaires et indispensables.

De nombreux changements sont nécessaires, mais ils ne peuvent pas non plus être planifiés sans la création préalable d'une nouvelle culture de la production agricole, libre des intérêts agrochimiques. Une société qui se soucie de la santé de la prochaine génération ne devrait pas perdre de temps.

LES ABEILLES AMBASSADRICES D'UN MONDE EN DANGER

LA MORT SOUDAINE DES ABEILLES

Dans de nombreux pays du monde, une augmentation de la fréquence de la mortalité des colonies d'abeilles et une diminution du nombre de colonies d'abeilles sont enregistrées depuis plusieurs années ; par exemple en Europe et en Amérique du Nord entre 1980 et 2008, ou en Allemagne entre 1952 et 2010.^{193, 867, 869} C'est probablement en 1881 que l'on a enregistré la première mort d'abeilles due à l'utilisation d'un insecticide : il était à base d'arsenic et était utilisé dans les champs de prunes.⁹⁷⁴ En 1929, le *pyrèthre* (*Pyrethrum*) a été responsable de la mort d'abeilles domestiques ; en 1930, les composés à base de cuivre ont posé des problèmes aux apiculteurs et en 1935, la roténone utilisée dans la culture des framboises a été la cause de l'augmentation enregistrée de la mortalité des abeilles.

Au cours des dix dernières années, l'augmentation de la mortalité des abeilles domestiques est devenue plus alarmante. Aux États-Unis, de 1985 à 1997, le nombre de colonies d'abeilles domestiques a diminué de 57%.¹⁹⁶ Ce phénomène a récemment été appelé "*mort subite des abeilles*" ou en anglais "*colony collapse disorder*". Cette expression est utilisée de manière récurrente par certains praticiens, experts et médias, alors qu'elle désigne des faits et de nombreuses incertitudes. L'augmentation de la mortalité des abeilles est parfois décrite comme une sorte de malédiction ayant des dizaines de causes (origine multifactorielle) ou, au contraire, comme un fléau dont les causes restent à identifier. En réalité, il est difficile d'accepter ce qui devrait être très évident.

On peut essayer de résumer ce qui est souvent présenté sous cet acronyme, qui fait penser à des disparitions soudaines d'abeilles dues à des causes mystérieuses. Le *trouble de l'effondrement des ruches* désigne la mort soudaine et brutale de colonies d'abeilles (*Apis mellifera*). Plus précisément, le trouble de l'effondrement des ruches se produit lorsque la plupart des abeilles ouvrières quittent la ruche, laissant derrière elles la reine, quelques assistantes et des réserves de nourriture abondantes. Il existe de nombreuses descriptions de cette peste dans la littérature, qui sont souvent contradictoires ; un résumé de certaines caractéristiques est donné ci-dessous :^{172, 243, 482}

- Perte rapide de la plupart des abeilles ouvrières : en quelques jours ou en une nuit.
- Présence d'une couvée abondante.
- Présence de la reine des abeilles.
- Abondance des ressources alimentaires (miel et pollen).
- Les stocks ne sont pas immédiatement volés par d'autres abeilles et l'attaque par d'autres insectes est considérablement retardée. Ce signal peut conduire à suspecter la présence de facteurs répulsifs pour les abeilles et les parasites dans la ruche.
- Absence ou présence de quelques abeilles ouvrières mortes à l'extérieur ou à l'intérieur de la ruche.

Ce sont des signes caractéristiques, mais ils ne sont pas toujours présents. Au contraire, dans certains cas, ils se manifestent différemment, comme le fait de trouver une grande partie de la colonie morte près de la ruche. Normalement, les abeilles ne quittent jamais une ruche où il y a un couvain abondant à élever et à nourrir. Les symptômes qui viennent d'être présentés peuvent probablement être attribués à une minorité de colonies connaissant une mortalité accrue (peut-être moins d'un quart). Toutefois, pour la petite histoire, il convient de préciser que, selon

certaines apicultrices, le premier cas de cette "mort mystérieuse" remonte à l'automne 2006, lorsqu'il a été signalé aux États-Unis. Selon certaines interprétations, d'autres cas se sont produits en février 2007, touchant de nombreux apicultrices nomades, dont certains ont perdu jusqu'à 50-90% de leurs ruches. La même année, des cas ont été recensés chez des apicultrices résidents en Amérique, mais aussi au Canada, au Portugal, en Italie, en Espagne, en Grèce, en Allemagne, en Pologne, en France et en Suisse.¹⁷² Aux États-Unis, une enquête réalisée en 2007 a estimé une perte moyenne de 31,8% des colonies (celles qui ont été déclarées mortes ou trop faibles pour survivre) ; cependant, seuls 29% des apicultrices ont signalé la présence d'un des signes caractéristiques de ce mystérieux syndrome, à savoir l'absence d'abeilles mortes à proximité de la ruche.²⁴³ L'année suivante, les apicultrices américains interrogés ont fait état d'un taux de mortalité plus élevé : 35,8% (les propriétaires de 450.000 ruches sur les 2.440.000 que comptent les États-Unis ont été interrogés). En 2009, la mortalité avait chuté à 29%, toujours supérieure à la mortalité naturelle attendue, qui devrait être inférieure à 15% ou 10%, et a augmenté à 32,4% en 2010. En 2010 également, seules 28% des ruches ayant enregistré une augmentation de la mortalité présentaient l'un des signes caractéristiques, à savoir l'absence d'abeilles mortes à proximité de la colonie. En 2011, une mortalité hivernale de 30% a été enregistrée. En 2012, les pertes de colonies sont rapportées à 29%, mais en 2013 elles atteignent 45%. Selon certaines estimations, la mortalité hivernale des abeilles aux États-Unis a atteint en moyenne 30% entre 2009 et 2016.⁸⁶⁸ En 2015, 2016 et 2018, les pertes annuelles sont d'environ 40%.

Entre 1950 et 2010, le nombre de colonies d'abeilles aux États-Unis a diminué de 45%.⁶⁰² Il y a de nombreuses années, entre 1966 et 1979, la perte de colonies a été attribuée à l'exposition à des pesticides tels que les pyréthroides, les organochlorés, les organophosphorés et les carbamates. Entre 1981 et 2005, le nombre de colonies est passé de 4,2 millions à 2,4 millions. Au cours de ces années, l'introduction de nouveaux ravageurs a aggravé la situation (*Acarapis woodi* en 1984, et *Varroa destructor* en 1987). Au cours des 60 à 70 dernières années, la diminution du nombre de colonies d'abeilles aux États-Unis a entraîné une réduction de la capacité de pollinisation des cultures.

Le recensement de la mortalité hivernale et de la mortalité globale des abeilles enregistré aux USA, de 2006 à 2019, révèle jusqu'à 45% de colonies mortes ; la mortalité est toujours supérieure au taux considéré comme économiquement acceptable (15% ou au maximum 20%).³⁷⁹

Au Canada, la mortalité des colonies d'abeilles, entre 2007 et 2017, a fluctué entre 15% et 35% (2007 29%, 2008 35%, 2009 34%, 2010 21%, 2011 29%, 2012 15%, 2013 28%, 2014 25%, 2015 16%, 2016 17%, 2017 25%).²⁴³ Ces valeurs indiquent que le seuil de mortalité considéré comme naturel (c'est-à-dire inférieur à 10%) et aussi économiquement non durable de 15% est constamment dépassé.

Une augmentation de la mortalité des colonies d'abeilles a été enregistrée en Europe : depuis 1997 en France et depuis 1999 en Belgique ; également en Allemagne, en Suisse, en Autriche et en Angleterre.⁸⁵⁹ En Angleterre, la mortalité a fluctué pendant des années entre 10 et 15%, mais elle est passée à 30% depuis 2008.²⁶⁰

En France, la production de miel a diminué de 22% entre 1991 et 2001.⁸⁵⁹ Les enquêtes menées en France entre 2007 et 2010 montrent un taux de mortalité des abeilles compris entre 23% et 30%. En France, cependant, en 2011, année pour laquelle on dispose de plus d'informations, les symptômes caractéristiques de la "disparition mystérieuse" sont enregistrés dans moins de 12% des colonies mortes (un des symptômes caractéristiques peu observé étant l'absence d'abeilles ouvrières). La plupart des mortalités enregistrées ne présentent pas les symptômes caractéristiques de l'effondrement des colonies. Cependant, un taux de mortalité supérieur au seuil économiquement inacceptable est également enregistré en France : une perte de colonies de plus de 15%. La production de miel en France diminue également de manière significative,

c'est-à-dire de 50% : de 32.000 t en 1995 à 16.000 t en 2003. ²⁸⁰ Les avis divergent largement sur les seuils de mortalité acceptables. Les apiculteurs considèrent qu'une mortalité allant jusqu'à 10% est normale, mais si elle dépasse 15%, le préjudice économique est considérable.

La production de miel en Italie est également en constante diminution : de 2011 à 2016, la production a chuté de 70%. Dans certains cas, comme le miel d'acacia, des pertes allant jusqu'à 80% ont été enregistrées. ¹⁹⁶ En 2006 et 2007, une enquête menée par l'EFSA (l'Autorité européenne de sécurité des aliments) a enregistré une mortalité des colonies en Italie comprise entre 40 et 50%. ²⁴³ Pour la plupart des mortalités enregistrées en Europe, il est difficile de savoir si les symptômes de l'effondrement des colonies sont apparus. Une enquête menée en Europe entre 2008 et 2009 (impliquant 9.471 apiculteurs possédant 172.252 ruches) a enregistré une mortalité moyenne de 12,3%, qui est passée à 20,9% en 2016 et 2017 (impliquant 14.813 apiculteurs possédant 425.762 ruches). ^{243, 246}

Pendant l'hiver 2015/2016, la mortalité hivernale enregistrée en Europe (421.238 colonies recensées au début de l'hiver) était de 12% : 12,5% pour l'Italie, 22,1% pour l'Espagne, 13,4% pour la France et 29,5% pour l'Irlande. ⁴⁷⁹

La mortalité accrue des abeilles d'élevage, malgré les soins prodigués par les apiculteurs, a entraîné une réduction drastique du nombre de colonies dans le monde : en 2008, elles étaient probablement réduites de moitié dans de nombreux pays. Il n'est pas impossible d'exclure un effondrement du système de pollinisation dans les années à venir, avec des répercussions également sur les cultures et la capacité à produire des aliments. L'augmentation de la mortalité des abeilles n'est rien d'autre que le signe d'un écosystème malade qui doit être modifié de toute urgence.

Les chiffres donnés ci-dessus, s'ils ne sont pas accompagnés de certaines informations essentielles (comme c'est souvent le cas), ne sont pas très informatifs car ils ne tiennent pas compte de facteurs importants tels que les soins apportés par l'apiculteur, comme les médicaments, la nourriture, le remplacement des reines, l'achat d'essaims et le nomadisme. Il convient de rappeler que la plupart des miels, même ceux produits en Italie, proviennent d'apiculteurs qui gèrent des centaines de ruches. Il s'agit d'exploitations industrielles où les abeilles vivent dans un nid artificiel et n'ont plus à se soucier de sécréter de la cire, puisqu'elle est fournie par recyclage, sont nourries avec des aliments et sont constamment déplacées dans des véhicules à roues à la recherche de nectars, de pollen et de meilleures conditions météorologiques. Il convient également de rappeler que les reines d'abeilles sont reproduites artificiellement et remplacées tous les trois ans au maximum, en les achetant à des exploitations apicoles qui peuvent utiliser des techniques biotechnologiques sophistiquées.

Les données sur l'évolution de la production de miel ou du nombre de colonies dans le temps ne sont pas, en soi, une indication de la santé de l'apiculture, car les apiculteurs peuvent, au moins partiellement, augmenter artificiellement et rapidement le nombre de colonies. En outre, les colonies peuvent être nourries et soignées artificiellement, de sorte qu'une augmentation de la production de miel peut être générée même dans des conditions défavorables. De nombreux paramètres doivent être évalués afin de mesurer la santé de l'apiculture, tels que l'apport énergétique (en termes d'équivalent pétrole) utilisé par la filière par unité calorique de miel produit, l'utilisation de pesticides, de médicaments et d'aliments pour animaux dans l'apiculture, les kilomètres parcourus par les abeilles et l'ensemble de la filière, l'intensité du renouvellement artificiel des colonies (par exemple, l'achat de reines), la fréquence du nomadisme et les maladies enregistrées. En l'absence de ces informations, les innombrables données, comme les graphiques qui peuvent être analysés en détail sur le site de l'Observatoire national du miel, représentent des valeurs absolues difficilement comparables et fournissent peu d'informations.

²⁰¹ Un effondrement soudain et conséquent doit certainement être une source de préoccupation, mais des indications exclusives sur la quantité de miel ou le nombre de colonies mortes ne peuvent fournir les informations nécessaires pour évaluer la gravité et le caractère artificiel de la

situation. Les indicateurs qui pourraient être pris en considération sont ceux relatifs à l'énergie dépensée par rapport à l'énergie obtenue, au transport effectué (km/honey/an), aux quantités d'aliments par ruche et par an, aux quantités d'antibiotiques et de pesticides par ruche et par an, à la fréquence des pathogènes présents dans les ruchers. Ce sont des données qui fourniraient des informations plus utiles. L'enregistrement des périodes de l'année où la mortalité se produit pourrait également fournir une confirmation utile.

La mortalité naturelle des abeilles est estimée à moins de 10% des colonies chaque année. Cependant, il existe un autre seuil au-delà duquel le préjudice économique devient substantiel. Certains apiculteurs professionnels considèrent qu'une mortalité des colonies de plus de 15% est intolérable. Les informations sur la mortalité ne suffisent pas à elles seules à estimer la gravité du problème, car les apiculteurs industriels, en particulier, achètent de nouvelles reines (elles peuvent vivre plus de cinq ans, mais aux États-Unis et au Canada, elles sont remplacées tous les deux ans ; de plus, l'insémination en laboratoire et la sélection artificielle peuvent être utilisées), achètent de nouvelles colonies entières et peuvent reproduire les colonies existantes en quelques mois. ²³⁰ Même si la production de miel de l'année est compromise, un bon apiculteur est capable d'obtenir trois essaims à partir d'une seule colonie. Comme nous l'avons déjà mentionné, nous devons également tenir compte d'autres aspects qui, s'ils sont ignorés, contribuent à rendre les véritables problèmes invisibles, comme l'alimentation artificielle, l'utilisation de médicaments et de pesticides dans l'agriculture et l'apiculture, et le nomadisme. Pour donner un exemple frappant, aux États-Unis, pendant les hivers 2006-2007 et 2007-2008, des taux de mortalité de 32% et 36% ont été enregistrés, mais durant la même période, on a constaté une augmentation du nombre de colonies de 5%, pendant l'hiver 2006-2007, et une réduction de 14% durant l'hiver 2007-2008. ⁴⁸⁴ Ainsi, les chiffres de mortalité sont très peu significatifs s'ils ne sont pas accompagnés d'autres informations telles que le nomadisme, l'achat de colonies entières, l'achat de paquets d'abeilles sans reines, l'achat de reines, la production de miel, la présence de maladies, etc.

Une étude portant sur la mortalité hivernale des colonies d'abeilles a été menée en Europe entre 2012 et 2014. Le projet (EPILOBEE) a été financé par l'Union européenne. ³⁸² La première année, cette étude a été menée dans 17 pays européens et dans 16 pays au cours des années 2012-2014. La mortalité hivernale a été enregistrée dans 9.566 ruchers en 2013 et dans 8.580 ruchers en 2014. Au cours des 2 années, 176.860 ruches ont été inspectées avec trois visites par an : une avant l'hiver, une à la fin de l'hiver et une à la fin de l'été. La mortalité au cours du premier hiver variait de 3,2% en Lituanie à 32,4% en Belgique (elle était de 5,5% en Italie). En 2014, la mortalité hivernale des colonies a varié entre 2,4% en Lituanie et 15,4% en Suède (elle était de 4,8% en Italie). ³⁸² Les pays d'Europe du Nord se sont avérés être les plus touchés. Par rapport à la mortalité enregistrée aux États-Unis, selon cette recherche, la mortalité observée en Europe est beaucoup moins inquiétante, puisqu'elle était inférieure à 15% dans la plupart des pays en 2013 et sur tout le Vieux Continent en 2014. La mortalité moyenne en hiver était de 15% la première année et de 8% la seconde, et en été de 4% la première année et de 3% la seconde. ³⁸³ Le taux de mortalité était donc très faible et, selon cette étude, non préoccupant. En ce qui concerne ce projet, il convient de remarquer que 117.269 tests de laboratoire ont été effectués à la recherche de certains parasites. Aucune information concernant les pesticides n'a été recherchée et les colonies ont été considérées comme non viables si elles contenaient moins de 500 abeilles. Aucune information n'a été enregistrée concernant la production de miel, qui est un autre indicateur utile et simple de la santé des colonies. Une grande partie des ruches ont été exclues de l'échantillon initial (par exemple, entre 15 et 24% en Italie). Cette étude, bien qu'elle ait mobilisé d'énormes ressources, ne porte que sur les manifestations des infections et des parasites (*Nosema*, *Varroa*, virus, etc.). On dispose de peu d'informations sur l'environnement dans lequel les ruches sont placées. Parmi les facteurs mis en avant à plusieurs reprises dans le document final, concernant les causes de la variabilité de la mortalité, figure le climat. ³⁸² Au

total, l'étude prend en compte 36 variables (sur plus de 100 initialement envisagées) telles que l'âge de l'apiculteur, la taille du rucher, le type de production (par exemple, miel et pollen), les problèmes de reines et divers parasites. Des choix politiques ont probablement été faits pour éviter d'avoir plus de détails sur l'impact généré par les pesticides. Dans cette étude, les causes associées à la mortalité hivernale comprennent : la localisation au sens large, c'est-à-dire l'état, la taille des ruchers, le type d'apiculteur (industriel ou amateur), l'objectif de l'apiculture (par exemple, la production de miel uniquement) ou la présence de la peste (une bactérie parasite).

³⁸³ La mortalité estivale est corrélée au niveau de formation de l'apiculteur ou à la présence de l'acarien *Varroa*. ³⁵⁸ Il n'existe pas d'informations concluantes sur l'influence de l'environnement autour des ruchers ou sur les traitements pesticides effectués par les apiculteurs et les agriculteurs. En ce qui concerne les pesticides, il est écrit que cette étude vise à fournir des informations pour les recherches futures sur les pesticides et l'interaction possible entre les ravageurs et les pesticides : *"Les résultats d'EPILOBEE étaient une condition préalable essentielle à la mise en œuvre de futures études explicatives portant sur les causes potentielles des pertes de colonies d'abeilles, telles que l'exposition multiple et la co-exposition aux pesticides (par exemple, insecticides, fongicides et acaricides) et leurs interactions possibles avec des agents infectieux "*. ³⁸³

Outre la prise en compte des pesticides distribués dans l'environnement et de ceux utilisés par les apiculteurs, les enquêtes sur la mortalité hivernale ou annuelle doivent tenir compte de nombreuses autres variables qui peuvent masquer la gravité de la situation, comme la multiplication des colonies : les apiculteurs peuvent facilement en obtenir deux ou trois à partir d'une seule. Un autre aspect est la possibilité d'acheter des reines ou des colonies entières, qui peuvent venir de très loin. Les apports en termes de pesticides (par exemple, les acaricides), d'antibiotiques (qui devraient être interdits), d'aliments pour animaux et l'intensité du nomadisme ne sont pas évalués. La production de miel n'est pas mesurée et le fait que, dans l'apiculture industrielle, les abeilles n'ont pas à fabriquer la cire pour les rayons, puisque la ruche est fabriquée à partir de rayons de cire recyclés, n'est pas pris en compte. Cela représente une économie d'énergie considérable pour la colonie et l'apiculteur obtiendra plusieurs kilos de miel supplémentaire. Un autre aspect très important est que si les apiculteurs constatent que leurs colonies sont atteintes de certains types de maladies considérées comme particulièrement dangereuses et pour lesquelles il existe une obligation de déclaration aux autorités vétérinaires, ils doivent détruire les colonies affectées par les parasites. Par conséquent, sans incitations, il y aura probablement une sous-estimation de certains problèmes qui seront intentionnellement dissimulés. En outre, il faut tenir compte des traitements illégaux dont nous avons constaté la pertinence. Considérer la mortalité pendant quelques mois sans évaluer les principaux aspects critiques revient à exclure a priori la possibilité de connaître le poids réel de plusieurs facteurs. Il est peut-être possible de faire une analogie simple pour mieux comprendre cette erreur méthodologique : il est difficile d'espérer obtenir des informations sur les effets du tabagisme en enregistrant uniquement les fumeurs qui décèdent en quelques mois. Ou alors on peut espérer fausser les résultats en menant une enquête sans enregistrer qui a fumé (pendant combien de temps et avec quelle intensité) et qui n'a pas fumé. La conclusion serait que la mortalité due au tabagisme est un risque très rare et négligeable ; on pourrait aussi dire que l'on est incapable de tirer une conclusion.

Les enquêtes partielles et scientifiquement incorrectes (par exemple d'un point de vue statistique) produisent des résultats hétérogènes, non comparables, non reproductibles et donc non concluants. Les données recueillies dans le cadre de ces études peuvent être utilisées pour construire des résultats et des interprétations très différents, peu objectifs et ayant malheureusement souvent une faiblesse commune : la sous-estimation du risque généré par les pesticides. ^{372, 397} Les outils mathématiques peuvent être habilement utilisés pour confirmer ou infirmer des hypothèses. Malgré l'application des méthodes les meilleures et les plus objectives,

les statistiques, comme tout domaine scientifique, ont des limites objectives. Par exemple, celui de considérer l'hypothèse comme mathématiquement utile et nécessaire au fonctionnement du modèle statistique.⁵⁷⁰ Le choix de la taille de l'échantillon et de nombreux autres facteurs peuvent jouer un rôle important en faveur ou en défaveur de l'hypothèse initiale. En fait, les mêmes données peuvent conduire à des résultats complètement opposés selon les limites du modèle statistique et mathématique utilisé. Ces limites peuvent être utilisées pour critiquer certains résultats ou en produire d'autres à l'appui de l'hypothèse privilégiée. Tout modèle expérimental souffre de limites telles que la possibilité d'enregistrer des faux positifs ou des faux négatifs. C'est-à-dire que les réponses obtenues ne dépendent pas de l'objet de l'étude. Ainsi, l'absence de désintéret et de détachement, en ce qui concerne la liberté des résultats possibles, implique que les protocoles de recherche peuvent être manipulés de manière subtile et peu visible, même d'un point de vue statistique. Les limites de la méthode scientifique peuvent être atténuées en renforçant certains aspects tels que l'impartialité, l'accessibilité, la transparence, la comparaison, la participation, la communication, l'utilité et le financement public.

LE SYNDROME D'EFFONDREMENT DES COLONIES (*COLONY COLLAPSE DISORDER*)

Parmi les différentes positions, on trouve ceux qui pensent que cette nouvelle maladie est présente principalement ou uniquement dans certaines régions du monde, comme les États-Unis. Selon certains, la "*mort subite des abeilles*", également connue sous le nom de *syndrome d'effondrement des colonies*, est donc un phénomène qui existe aux États-Unis mais pas en Europe.^{252, 869} Il convient de souligner que, heureusement, tout le monde n'est pas d'accord sur l'existence de ce syndrome, dont les causes n'ont pas encore été découvertes. Il est plus réaliste de penser que les facteurs qui nuisent aux abeilles sont d'origine humaine ; les causes sont multiples et chacune a un poids différent selon le contexte, mais la situation est tellement répandue que le résultat final est toujours le même : une augmentation de la mortalité des pollinisateurs tels que les abeilles. Cette mortalité est partiellement et temporairement compensée par une augmentation de la production artificielle de nouvelles colonies par les apiculteurs : importation de nouvelles reines d'abeilles auprès d'entreprises spécialisées dans ce type de marché (elles pratiquent la fécondation assistée), fourniture de plus de nourriture, distribution de plus de médicaments tels que les acaricides, déplacement des colonies plus souvent et sur de plus grandes distances, fourniture d'un nid artificiel avec de la cire, achat de nouveaux essaims.

Certains des facteurs qui contribuent sans aucun doute à rendre la vie des abeilles très difficile et qui sont à l'origine de leur mort, parfois décrite comme soudaine mais néanmoins prévisible et évitable, sont bien décrits dans une enquête intéressante sur le monde des abeilles : le documentaire "*Un monde en danger*"¹ qui se concentre sur les abeilles et explore la question de leur relation avec l'homme. Il montre la relation difficile entre les abeilles et les humains et, plus généralement, entre l'homme et la nature. Dans le documentaire, plusieurs ruches sont montrées à travers le monde, notamment en Californie, en Chine, en Suisse et en Australie.

En réalité, des facteurs très différents, dont chacun est capable à lui seul d'exterminer les insectes, ont, dans des contextes et des situations différents, une influence variable sur le résultat final. Aux États-Unis, en 1947, il y avait au moins 6 millions de ruches, mais après soixante ans, elles ne sont plus que 2,6 millions.¹⁹⁶ Une réduction drastique du nombre de ruches a également été enregistrée en Allemagne : entre 1952 et 2010, plus d'un million de colonies ont disparu.⁸⁶⁹

¹ *Un monde en danger* est un film documentaire suisse de 2012 réalisé par Markus Imhoof.

Divers scientifiques s'accordent à dire que cet effet a différentes causes, individuelles ou conjointes, selon les conditions. Comme nous l'avons amplement démontré, les abeilles sont exposées par les principaux bénéficiaires de leurs services en termes économiques, les agriculteurs et les apiculteurs, à des centaines de molécules toxiques. Ces opérateurs exposent volontairement et systématiquement les abeilles et leur environnement à des substances toxiques. Ainsi, parmi les principales causes d'augmentation de la mortalité figurent les pesticides tels que les insecticides.

Les insecticides sont conçus pour exterminer les insectes et peuvent provoquer une mortalité de 100% (par contact) des abeilles. Certains toxicologues considèrent que les molécules qui entraînent une mortalité de 30 à 40%, au lieu de 90 à 100%, sont moins dangereuses.⁸⁶⁶ Pourquoi devrions-nous être surpris si les abeilles meurent lorsqu'elles sont exposées aux molécules les plus puissantes que nous avons conçues spécifiquement pour exterminer les insectes ? Ces molécules sont synthétisées dans le but de tuer entre 40% et 100% des insectes (en quelques minutes ou heures) lorsqu'elles sont contaminées à très faible dose (millionièmes de gramme par insecte). Les attentes des agriculteurs quant aux effets des insecticides et autres pesticides sont différentes de celles des apiculteurs, mais tant la monoculture chimique que l'apiculture intensive sont souvent ancrées dans l'analphabétisme environnemental. Malheureusement, les conséquences du non-respect des lois de la nature s'avèrent dévastatrices : nous avons sous-estimé les effets négatifs pendant trop longtemps. L'une des mesures de précaution les plus largement appliquées par les agriculteurs consiste à avertir les apiculteurs au moins deux jours avant de distribuer des pesticides tels que des insecticides directement (avec des pulvérisateurs) ou indirectement (avec des semences). C'est la mesure de protection proposée par le président de l'*Institut européen pour le développement durable en agriculture* ou EISA.⁸⁶⁹ Dans le même document, il est écrit que les pesticides sont essentiels pour fournir des aliments sûrs et que, lorsqu'ils sont utilisés correctement, ils ne génèrent pas d'effets inacceptables sur les organismes non ciblés tels que les abeilles et les oiseaux pollinisateurs (pour mémoire, ce document est également signé par l'*Organisation européenne des propriétaires fonciers* ou ELO et l'*Association européenne de protection des cultures* ou ECPA). Le même document recommande également d'enlever les fleurs (sauvages bien sûr) à proximité des champs à traiter, juste avant l'application des pesticides. Il est donc recommandé de détruire la seule nourriture naturelle connue des abeilles. Il est incroyable de penser que nous pouvons sauver les abeilles (et d'autres) en continuant à utiliser des poisons extrêmement puissants (pesticides) et en détruisant la seule nourriture dont elles disposent : les fleurs. Au lieu de s'attaquer sérieusement au problème, on le contourne, sans rien changer, en proposant des actions insignifiantes ou dévastatrices, selon le point de vue : celui de l'apiculteur ou celui de la Nature. L'augmentation de la mortalité peut certainement être liée à la réduction de la biodiversité et à l'utilisation de produits chimiques dans l'agriculture.

Un autre facteur influençant les chiffres de mortalité est la taille de l'apiculteur. Les grands apiculteurs, c'est-à-dire ceux qui gèrent plus de 25 colonies, sont mieux à même de contrer l'augmentation de la mortalité. C'est l'une des raisons pour lesquelles le nombre de petits apiculteurs aux États-Unis a diminué de 70% entre 1987 et 2002.⁴⁸⁴ Les grands apiculteurs peuvent plus facilement augmenter rapidement le nombre de colonies pour contrer la mortalité accrue, notamment pour des raisons économiques. Ils sont également plus habiles dans l'utilisation des pesticides et des médicaments.

Les statistiques de mortalité doivent également être accompagnées d'informations sur la productivité, comme la quantité de miel par ruche. Par exemple, la France a perdu la moitié de sa capacité de production de miel en moins de 20 ans, depuis 1990.

Une erreur pourrait être d'espérer trouver dans un avenir lointain une nouvelle cause, jusqu'alors inconnue, de la mortalité accrue des abeilles, sans considérer que les connaissances actuelles sont plus que suffisantes pour expliquer ce phénomène. Ainsi, d'une part, nous risquons de

consacrer des ressources à la recherche de fantômes et, d'autre part, nous détournons l'attention des problèmes connus et concrets qui doivent être traités de toute urgence, tels que le risque chimique et la réduction de la biodiversité. Il convient de rappeler que certaines des enquêtes qui ont tenté de classer et de cataloguer les symptômes enregistrés par les apiculteurs, qui ont signalé une augmentation anormale de la mortalité, ont mis en évidence les facteurs suivants :

247

- Mortalité des colonies au moment de la floraison du tournesol et tout de suite après.
- Diminution de la production de miel après la floraison du tournesol.
- Les abeilles tremblent après la floraison des tournesols.
- Disparition de la reine.
- Diminution du nombre de larves.
- Peu ou pas de production de miel.
- Présence d'abeilles tremblantes.
- Présence d'abeilles apathiques à proximité de la ruche et sur le sol.

L'un des effets enregistrés dans les colonies d'abeilles en France (c'était en 1979), suite à l'utilisation de la deltaméthrine, un insecticide pyréthrianoïde nouvellement commercialisé, est qu'aucune abeille morte n'a été retrouvée près de la ruche, car elles sont mortes loin ou n'ont pas pu retourner à la colonie. ²⁴³

La liste ci-dessus met en évidence certaines des conséquences de l'exposition à des doses sublétales, c'est-à-dire très faibles, de pesticides ou générées par des effets additifs, là encore à des concentrations difficiles à mesurer instrumentalement. Ainsi, les pesticides peuvent à eux seuls expliquer les symptômes de la "*mort subite des abeilles*", à la fois individuellement et, a fortiori, dans des mélanges complexes, bioaccumulatifs et persistants. À cette contribution négative à la santé des abeilles, il faut ajouter ou plutôt multiplier d'autres facteurs : malnutrition, maladies, polluants, réduction de la biodiversité et changement climatique.

La mortalité des abeilles domestiques d'élevage est alarmante, mais en comparaison, la biodiversité des insectes pollinisateurs sauvages subit des attaques encore plus dures. Pour donner une idée de la gravité du problème, la biodiversité des pollinisateurs sauvages a diminué de 52% en Grande-Bretagne et de 67% aux Pays-Bas depuis 1980. Ces dommages sont irréversibles et inestimables. ²⁴³

DILUTION MULTIFACTORIELLE

Comme pour le réchauffement climatique, l'un des thèmes utilisés pour détourner l'attention de sujets inconfortables est que ces changements se sont produits dans le passé. Le message proposé est qu'il y a aujourd'hui une augmentation d'un phénomène naturel qui s'est également produit dans le passé : en 950 en Irlande, en 1869 aux USA, au Mexique et en Australie, en 1900 en Utah (USA), en 1995 en Pennsylvanie (50% des colonies sont mortes dans cet état américain). ²⁴³ En 1900, dans l'Utah, l'augmentation de la mortalité avait déjà reçu le nom de *maladie des abeilles disparues*. Dans les années 1960, plusieurs cas de déclin soudain des abeilles causé par les pesticides ont été enregistrés aux États-Unis : en Arizona, 48% des colonies ont été perdues entre 1963 et 1977. ⁴⁸⁴ En 1967, 70.000 colonies d'abeilles ont disparu en Californie à cause d'un insecticide organochloré : le carbaryl. ⁸⁵⁹

Une autre possibilité mystérieuse proposée dans la littérature est celle d'un phénomène cyclique se produisant tous les 2-7 ans, indépendant des insecticides (néonicotinoïdes) ou des maladies (*Varroa*). ⁸⁵⁹

Parmi les messages erronés rapportés lors de la discussion sur la mort subite des abeilles, il y a l'assimilation de plus de 60 facteurs différents tels que : ^{35, 240, 243, 246, 252, 307, 481, 482, 484, 697, 1155}

- plus de 20 types de virus,
- plus de 10 parasites, dont des acariens, des insectes, des champignons et des bactéries,
- le changement climatique,
- l'altération du cycle de l'azote,
- la perturbation générée par les inspections de la ruche par les apiculteurs,
- la fragmentation des écosystèmes,
- le vol des avions,
- les champs électromagnétiques,
- les lignes électriques,
- la distribution incorrecte de semences traitées aux pesticides,
- les pylônes de téléphonie mobile.

Elle soutient l'hypothèse irréaliste selon laquelle les colonies d'abeilles sont rarement tuées par les pesticides, tels que les insecticides utilisés dans l'agriculture.⁹⁷⁴

Cette stratégie est potentiellement très convaincante et permet de diluer les problèmes dans une myriade de facteurs. La dilution multifactorielle se traduit facilement par l'inaction et contribue efficacement à détourner l'attention des principaux problèmes. Malheureusement, des dizaines de chercheurs du monde entier se sont lancés à la recherche de ces fantômes, ce qui constitue un véritable gaspillage de ressources.^{246, 253, 260, 280, 307, 479, 482, 597} À ce stade, nous pourrions ouvrir une longue parenthèse sur les explications les plus fantaisistes des phénomènes mystérieux, mais il vaut mieux couper court à la conversation et éviter de gaspiller d'autres commentaires. L'attention est diluée entre de nombreux facteurs, et une simplification excessive les place tous au même niveau de danger.^{357, 358, 382, 482, 484, 678, 860} Par exemple, les plus de 18.000 produits pesticides commerciaux contenant un ou plusieurs des 1.200 ingrédients actifs autorisés aux États-Unis sont mis sur le même plan que plus de 60 facteurs.⁶⁷⁸ En 2010, au moins 32% de la surface cultivée aux États-Unis est traitée avec des néonicotinoïdes et certaines cultures, comme le maïs, enregistrent des semences traitées aux pesticides dans 99,8% de la surface cultivée avec cette céréale (0,2% de la surface de maïs est biologique et ne devrait donc pas utiliser ce traitement chimique). Dans ces cas, proposer la multifactorialité comme explication est encore plus difficile, lorsqu'il s'avère que plus de 50% du pollen collecté par les abeilles provient de maïs qui contient ces puissants insecticides, les néonicotinoïdes (un hectare de maïs peut produire plus de 150 kg de pollen).^{678, 974} Le pollen prélevé sur des plantes non traitées, comme les pissenlits, contient également des néonicotinoïdes (par exemple la clothianidine) ; l'explication est simple : les néonicotinoïdes sont persistants et peuvent donc se déplacer dans la biosphère.⁶⁷⁸ Les colonies d'abeilles situées à proximité des champs de maïs, qui couvrent des millions d'hectares aux États-Unis, sont exposées à des doses de néonicotinoïdes équivalent à au moins 50% de la DL₅₀ dans les dix premiers jours de leur vie.⁶⁷⁸

Le multifactorisme est un message trompeur véhiculé stratégiquement dans de nombreux contextes différents, et il a une longue histoire : tabac, amiante, plastifiants. Dans le cas des abeilles, le risque généré par les pesticides est comparé au déséquilibre généré dans la colonie par la manipulation et l'intrusion constantes des apiculteurs (inspections à la fumée), l'utilisation d'aliments à faible valeur nutritive, l'utilisation de téléphones portables, le changement climatique, les avions en vol ou la mauvaise qualité du pollen.^{243, 482} Il est très approximatif de penser confondre ces différentes causes en les assimilant. Un autre exemple de mauvais message est celui du changement climatique et des papillons. Certaines espèces de papillons, censées être favorisées par le changement climatique (réchauffement), sont en fait en déclin à cause des pesticides et de la réduction de la biodiversité (herbicides, herbivores, monocultures et aussi changement climatique comme les sécheresses ou les inondations).

La méthode consistant à diluer l'attention entre des facteurs très différents qui contribuent en fait avec des poids différents est une stratégie de distraction qui a été utilisée systématiquement dans de nombreuses histoires tristes du passé, comme celles des industries de la cigarette ou des usines d'amiante.²⁶⁰ Les multinationales du tabac ont systématiquement financé des pseudo-sciences au service de l'argent.³⁰⁷ On peut dire la même chose des personnes qui ne croient pas au changement *climatique* d'origine humaine, les "*climato-sceptiques*". Jamais probablement dans l'histoire de la science, il n'y a eu un accord planétaire aussi unanime sur les causes du changement climatique et sur les mesures à prendre pour éviter la catastrophe. Pourtant, l'industrie du doute parvient à obtenir de très bons résultats.

La machine à douter est alimentée de diverses manières, notamment par des déclarations infondées et trompeuses ou par l'utilisation de sources non fiables.^{722, 723} La création d'un message qui met en évidence l'incertitude des connaissances, comme les effets désastreux des pesticides sur les insectes, la biodiversité et la biosphère. Les attaques de l'industrie du doute sur la science du climat sont également bien connues et documentées.⁶⁸⁰

La machine à désinformer parvient à avoir une influence énorme en encourageant dangereusement les mauvaises décisions. Des fantômes sont générés qui, en tant que tels, sont introuvables, ce qui permet d'obtenir l'effet désiré : retarder les actions qui restreignent la liberté d'entreprendre et poursuivre les affaires du mieux possible. La machine à désinformer crée la confusion et l'ignorance, ce qui permet de retarder toute action politique et collective nécessaire. En utilisant correctement la méthode d'investigation scientifique, il est facile de voir que les affirmations des campagnes de désinformation sont superficielles et dictées par l'opportunisme politique et économique. Malheureusement, ils réussissent à détourner l'attention et à instiller le doute, retardant ainsi l'action nécessaire et urgente. La *mort soudaine des abeilles*, présentée comme mystérieuse et effrayante, risque d'être utilisée comme un moyen de manipuler la science pour détourner l'attention des vrais problèmes et la focaliser sur des facteurs incohérents. Les informations dont nous disposons sont plus que suffisantes pour tirer la sonnette d'alarme et appliquer au moins le principe de précaution lorsqu'il existe encore une incertitude raisonnable et avérée.⁵⁷¹ L'un des effets délétères de cette désinformation est le gaspillage d'énormes ressources économiques dans des activités inutiles, car elles ne sont pas fondées sur les principes de la méthode scientifique mais sur le principe de la satisfaction d'intérêts privés. Rien qu'aux États-Unis, des millions de dollars sont gaspillés pour tenter d'expliquer la mort subite des abeilles ou le "*Colony Collapse Disorder*".⁸⁶⁷ Pour donner un exemple européen, le projet *EPILOBEE* évoqué plus haut a été financé par 3,3 millions d'euros (fonds publics) : au total, le projet a coûté plus de 5 millions d'euros et a nécessité l'utilisation de ressources considérables telles que 1.350 inspecteurs.³⁸² En conclusion, l'acronyme "*CCD*", qui, comme nous l'avons déjà mentionné, désigne l'expression fantaisiste "*Colony Collapse Disorder*", pourrait être utilisé de manière responsable comme un manifeste pour le syndrome de l'aveuglement face à un désastre planifié, c'est-à-dire pour représenter la production et les pratiques alimentaires non durables.

GESTION INEFFICACE DE LA PRÉVENTION DES RISQUES POUR LES ABEILLES : des intérêts particuliers au lieu du bien commun

La faiblesse évidente du système de contrôle et de réglementation vis-à-vis de grands intérêts économiques tels que ceux des entreprises commercialisant des pesticides et des semences de céréales rendues artificiellement résistantes à de fortes concentrations d'herbicides (maïs et soja génétiquement modifiés) est très préoccupante.

Les informations sur la toxicité des pesticides pour les abeilles présentent de nombreuses faiblesses. Les méthodes analytiques utilisées pour obtenir des informations sur la toxicité se concentrent sur les effets aigus mesurés sur quelques heures ou jours. Les évaluations à long terme, telles que les effets chroniques, ne sont pas effectuées. L'évaluation toxicologique est basée sur la mesure de la dose qui tue 50% des individus exposés en laboratoire, par ingestion ou par contact (DL_{50}) sur un ou au maximum trois jours. Il y a un risque qu'une substance soit considérée comme dangereuse lorsqu'elle peut tuer 49% des abeilles en moins de trois jours. Un suicide intellectuel et économique. On sait depuis plus d'un siècle que de petites doses de substances toxiques prises sur une longue période peuvent avoir des effets mortels identiques ou supérieurs à ceux d'une forte dose prise sur une courte période. Il serait approprié de nommer ce seuil (DL_{50}) "*la valeur d'acceptabilité selon des critères politiques et économiques*". En devenant un concept commercial et politique, la dose acceptable est monétisée. L'évaluation toxicologique des risques pour l'homme par le biais de l'expérimentation animale peut également être menée de manière à rendre les résultats plus favorables à des objectifs prédéterminés. Par exemple, le choix des animaux de laboratoire les plus résistants aux effets des perturbateurs endocriniens, ou le choix approprié du régime alimentaire donné aux cobayes, peuvent favoriser une multiplication par milliers des doses nécessaires pour mesurer les effets indésirables.²⁶⁰

L'évaluation toxicologique des abeilles, dans le cas des pesticides, présente de nombreuses limites.

- Elle n'est pas effectuée sur des organismes non ciblés tels que d'autres insectes pollinisateurs.
- Elle n'évalue pas les effets chroniques, sublétaux, synergiques et/ou additifs. On sous-estime le fait qu'une exposition intermittente, tout au long de la vie, à de faibles doses peut avoir des effets tout aussi dangereux.⁴¹⁹ L'erreur méthodologique est très grossière. Pour faire une comparaison, c'est comme si on essayait de mesurer le danger du tabagisme en ne considérant que la dose unique qui peut tuer 50% des fumeurs. On a probablement besoin des cigarettes contenues dans plus de 100 paquets. La conclusion d'une telle étude ne pourrait être que positive pour l'industrie : ne nous inquiétons pas car la probabilité de mourir est négligeable. L'exposition des abeilles aux pesticides est considérée comme sûre lorsqu'elle est inférieure à un dixième de la concentration létale, alors que d'innombrables études montrent depuis longtemps que les expositions chroniques, à des doses inférieures à un millième de la DL_{50} , sont mortelles, surtout lorsqu'elles sont associées à d'autres molécules qui renforcent leur toxicité.³⁷⁸ Il est très difficile de déterminer les éventuels effets sublétaux, c'est-à-dire ceux générés par de très faibles concentrations et une exposition sur de longues périodes. Par exemple, l'exposition répétée pendant dix jours à une dose 100.000 fois plus faible suffit à générer la même mortalité en 48 heures chez les abeilles qu'une dose unique d'imidaclopride (60 ng). Dix jours peuvent être considérés comme la durée d'une floraison, et les concentrations les plus faibles sont celles mesurées dans les fleurs, le pollen et le nectar. Souvent, le nectar et le pollen des plantes traitées avec des insecticides néonicotinoïdes (comme les graines de tournesol) contiennent des concentrations inférieures à 10 ppb (parties par milliard).²⁶⁰ Cette dose est 100.000 fois inférieure à celle qui peut tuer 50% des abeilles après une seule administration, mais si l'exposition a lieu sur une période de deux semaines, elle peut produire le même effet mortel. Le même problème se pose avec les plantes génétiquement modifiées dont la toxicité, lorsqu'elles sont consommées, est testée en laboratoire pendant moins de 90 jours (sur des cobayes).⁵⁵⁷
- Elle est réalisée sur des modèles expérimentaux qui, dans certains cas, ne reflètent pas suffisamment la réalité ; par exemple, on utilise des abeilles domestiques composées de moins d'un cinquième du nombre d'insectes d'une colonie (on utilise des colonies artificielles

de moins de 10.000 insectes). Dans certains cas, seules quelques dizaines d'insectes sont utilisées.

- Les protocoles d'étude des effets néfastes sur les insectes et autres êtres vivants ne tiennent pas compte du fait que les organismes cibles et tous les autres sont exposés à des mélanges complexes et variables dans le temps, même au cours de leur vie. Il est très difficile de mesurer à l'avance les effets synergiques, c'est-à-dire ceux générés par différentes combinaisons de mélanges, car cela est très coûteux et souvent les combinaisons sont si nombreuses qu'il est impossible de ne tester qu'une fraction d'entre elles. ^{419, 497} En outre, il existe des centaines de milliers d'autres molécules polluantes produites par les activités humaines qui interagissent avec les pesticides et dont les multiples synergies sont pratiquement impossibles à étudier.

- Les effets sublétaux tels que les effets chroniques sont générés par de très faibles concentrations de l'ordre du millionième de gramme par kilogramme de matrice telle que le pollen, le nectar ou le miel. Les concentrations sont si faibles que de nombreuses méthodes d'analyse (par exemple, la chromatographie liquide à haute pression avec un analyseur UV pour l'imidaclopride, qui est une molécule polaire et thermolabile) peuvent mesurer jusqu'à dix, vingt fois ou plus les concentrations résiduelles dans les plantes et les produits apicoles (comme déjà mentionné, il s'agit de concentrations pouvant générer des effets sublétaux). ³⁶³ Par conséquent, les molécules recherchées par certaines méthodes d'analyse, même lorsqu'elles sont présentes à des concentrations capables de provoquer des effets négatifs, sont invisibles. Cet aspect doit nous faire réfléchir sur la capacité à obtenir des informations (tant préventives qu'a posteriori), avec des méthodes analytiques qui peuvent être inadaptées. Il est laborieux et coûteux d'utiliser des méthodes de recherche analytique présentant des niveaux de sensibilité suffisants pour mesurer les faibles concentrations auxquelles les effets biologiques indésirables peuvent être mesurés. Par exemple, mesurer la concentration de néonicotinoïdes avec des méthodes qui ne permettent pas de détecter des concentrations inférieures à 1 mg/kg signifie que des niveaux de contamination pouvant tuer les abeilles et générer d'autres effets négatifs ne peuvent être détectés. ⁴⁷⁵ Les concentrations biologiquement actives de ces substances sont plus de 1.000 fois inférieures (à 1 mg/kg) et sont également celles qui sont le plus susceptibles d'être trouvées dans des matrices telles que le pollen, le nectar et les produits apicoles. Lorsque les insecticides néonicotinoïdes ont été commercialisés dans les années 1990, la meilleure limite de détection analytique était de 10 ppb (0,01 mg/kg ou ppm). ⁵⁵³ Cette sensibilité instrumentale n'a pas permis de détecter les concentrations les plus courantes dans les feuilles, le nectar et le pollen de tournesol et qui sont capables de générer des effets d'une exposition chronique équivalents à ceux d'expositions uniques à des doses 100 ou 1.000 fois supérieures. Les semences traitées à l'imidaclopride présentent des concentrations de 3,3 ppb dans le pollen et de 1,9 ppb dans le nectar de tournesol, ou de 2-4 ppb dans le pollen de maïs. Il ne faut pas oublier que le pollen est le principal nutriment des jeunes abeilles et que, par conséquent, de très faibles concentrations (inférieures à 10 ppb) peuvent encore poser des problèmes aux insectes. Une exposition chronique à 0,1 ppb, ce qui équivaut à 12 pg/abeille en 10 jours, entraîne la mort de 50% des individus. ⁵⁵³ Ainsi, des concentrations 100 fois inférieures au seuil de détection des instruments de laboratoire sont capables de tuer 50% des abeilles lorsqu'elles sont exposées aux contaminants pendant 10 jours. La conclusion alarmante est que les effets d'une exposition chronique sont équivalents à ceux d'une exposition à une dose unique, mais qu'ils se produisent à des concentrations plus de 1.000 fois inférieures. Malgré ces résultats, un seuil de sécurité (concentration en dessous de laquelle aucun effet dangereux sur les colonies d'abeilles ne devrait être enregistré) de 20 ppb

a été proposé en 2002, alors que des concentrations de l'ordre de 0,3 ppb (par exemple dans le pollen) pouvaient déjà être mesurées et que l'on savait déjà que des effets sublétaux se produisaient à ces concentrations beaucoup plus faibles.⁵⁵³ Ces connaissances scientifiques librement disponibles ont été ignorées.

- Les effets des dérivés des principes actifs ne sont pas pris en compte, comme les métabolites, qui peuvent être beaucoup plus persistants et tout aussi dangereux. À cet égard, il convient de mentionner que l'imidaclopride génère plusieurs métabolites, dont certains sont certainement aussi dangereux pour les abeilles, tels que : 5-hydroxy-imidacloprid, 4-hydroxy-imidacloprid-, 4-5 hydroxy-imidacloprid, oléfine, imidacloprid-guanidine, imidacloprid-urée et acide 6-chloronicotinique (ce dernier métabolite a été trouvé dans 44,4% des échantillons de pollen examinés, alors que 49,4% contenaient de l'imidacloprid).⁵⁵³ Les produits utilisés dans les mélanges sont également sous-estimés et souvent considérés comme inoffensifs sans les tests nécessaires.⁴¹⁹
- Les tests expérimentaux réalisés sur le terrain ne parviennent guère à évaluer les différences dans les colonies témoins, c'est-à-dire celles qui ne sont pas exposées aux pesticides. Les abeilles à exposer aux pesticides à étudier sont placées à proximité d'un champ traité avec une seule molécule (par exemple, les néonicotinoïdes dans le maïs) d'une superficie comprise entre 2.500 et 10.000 mètres carrés ; il ne faut pas oublier que les abeilles peuvent se déplacer dans un rayon de quelques kilomètres, elles peuvent donc préférer visiter des fleurs sauvages plus attrayantes au loin, ou des cultures différentes en étant exposées à d'autres pesticides. Les colonies témoins, c'est-à-dire celles théoriquement non contaminées par la molécule étudiée, ne sont pas très représentatives car, même si la ruche expérimentale est placée dans une zone dédiée à l'agriculture biologique, les abeilles peuvent se déplacer jusqu'à 5-10 km. Il est donc pratiquement impossible qu'elles n'entrent pas en contact avec des pesticides. La probabilité de mesurer les effets générés par une seule molécule, dans des colonies situées à des endroits différents, sans interférence indésirable et incontrôlable d'autres contaminants est nulle. Il est donc très facile de produire des résultats utiles pour l'agriculture chimique : aucune différence de mortalité entre les colonies exposées et non exposées.³⁰⁷ L'erreur méthodologique peut être facilement comprise à l'aide de l'exemple suivant : c'est comme si l'on essayait de mesurer l'effet de la fumée de tabac sur les voies respiratoires en comparant un groupe de personnes qui fument un paquet de cigarettes par jour et qui vivent en ville, et un groupe qui fume avec la même intensité mais qui vit à la campagne. Le résultat est évident : la différence d'incidence doit être attribuée à d'autres facteurs tels que la pollution atmosphérique dans les zones urbaines. La méthode expérimentale aurait dû permettre de faire des comparaisons avec des groupes de non-fumeurs.
- Les procédures adoptées pour mettre en œuvre l'analyse des risques liés aux pesticides ne tiennent pas compte des effets sur l'ensemble de la colonie, car elles se concentrent sur la mesure des effets aigus, qui peuvent être enregistrés en quelques heures sur un petit nombre d'individus.¹¹⁸⁴
- La procédure d'analyse des risques a été confiée presque entièrement aux entreprises de pesticides elles-mêmes, avec un conflit d'intérêts évident.¹¹⁸⁴ Il est impossible de connaître les éventuels conflits d'intérêts entre les participants aux tables de décision pour l'autorisation des pesticides. Certains scandales documentés font état de taux de conflits d'intérêts atteignant 75% des experts.³⁰⁷

D'autres facteurs limitent nos connaissances :⁴¹⁶

- Le manque d'informations sur les pesticides vendus et utilisés.
- L'impossibilité de mesurer la concentration d'une molécule quelconque dans différentes matrices environnementales (par exemple, les plantes, l'eau et le sol).
- Les effets à long terme sont largement inconnus et ne sont pas faciles à étudier a priori. Certaines molécules restent actives dans l'environnement pendant des années.
- Les effets sur les organismes non ciblés sont largement inconnus et peu étudiés (par exemple dans le sol).
- Les effets de la bioaccumulation sont mal connus.
- Les interactions entre les maladies, les pénuries alimentaires, les habitudes alimentaires et d'autres facteurs tels que les pesticides sont mal comprises.

Enfin, il est important de souligner que les avantages en termes d'augmentation de la production et pour les agriculteurs résultant de l'utilisation de pesticides ne sont pas très évidents.

LA POLLUTION CONTAMINE LES FLEURS SAUVAGES, LES OISEAUX ET LES INVERTÉBRÉS DANS LE SOL

Pour étayer la difficulté d'isoler les facteurs souhaitables des facteurs ingérables sur le terrain, il est utile de remarquer que l'exposition des abeilles aux pesticides présents dans les plantes sauvages et spontanées peut être plus élevée que l'exposition provenant des cultures. Pour les abeilles, 97% de l'exposition aux néonicotinoïdes peut provenir du pollen de fleurs sauvages, plutôt que du pollen de cultures.³⁶⁹ Dans le pollen collecté d'espèces végétales sauvages, on peut trouver des concentrations de néonicotinoïdes allant jusqu'à 200 ng/g (dans le pollen stocké par les abeilles dans la ruche).³⁶⁹ Les ruches ont été positionnées à proximité de champs de colza (semences traitées aux néonicotinoïdes) et de champs de blé (semences traitées aux néonicotinoïdes). Tous les échantillons de sol, prélevés quelques mois après le semis du colza, contenaient de l'imidaclopride, du thiaméthoxam et son métabolite la clothianidine ; 42,9% des échantillons de sol contenaient du thiaclopride. Il convient de remarquer que l'imidaclopride et le thiaclopride n'avaient pas été utilisés au cours des trois années précédant l'échantillonnage. Ces molécules sont également présentes dans les champs voisins non traités (avec des concentrations plus faibles). Les sols cultivés avec du blé, dont les graines ont été traitées avec des néonicotinoïdes, contiennent également ces molécules. La clothianidine est trouvée dans 100% des échantillons de sol de blé, l'imidaclopride dans 75%, le thiaméthoxam dans 50% et le thiaclopride dans 25% des échantillons.³⁶⁹ Dans le cas du colza oléagineux, 100% des échantillons de pollen contiennent le thiaméthoxam donné dans les graines et il est également contenu dans 54% des échantillons de nectar (ils contiennent aussi la clothianidine qui est son métabolite). La concentration maximale de thiaméthoxame dans le pollen de colza était de 11,1 ng/g et dans le nectar de 13,3 ng/g. Parmi les échantillons de pollen, 90,5% contenaient de la clothianidine et 85,7% du thiaclopride. Cinquante-huit pour cent des 43 échantillons de pollen provenant de plantes sauvages situées à proximité des champs de colza contenaient les mêmes néonicotinoïdes, comme le thiaméthoxam (*Heracleum sphondylium* 86 ng/g et *Papaver rhoeas* 64 ng/g). Le résultat alarmant de cette recherche est que les néonicotinoïdes sont plus concentrés dans le pollen des plantes sauvages poussant à proximité des champs traités que dans le pollen des plantes traitées telles que le colza. Même l'imidaclopride, qui n'a pas été trouvé dans le pollen de colza, était présent dans le pollen de plantes sauvages poussant à proximité (dans 11,6% des échantillons de pollen de plantes sauvages). En outre, 20,8% des échantillons de nectar de plantes sauvages contenaient du thiaméthoxam, mais à des concentrations plus faibles que le nectar de colza. Les colonies d'abeilles situées près des champs de colza ne contenaient que 9,9% de pollen provenant de cette

culture, ce qui indique qu'elles visitent probablement ces fleurs pour obtenir principalement du nectar. La plupart du pollen collecté par les abeilles (62,5%) dans cette étude appartenait à l'aubépine (*Crataegus monogyna*) pendant le mois de juin et à d'autres espèces pendant le mois d'août *Epilobium hirsutum* (23,1%) et *Rubus fruticosus* ou ronce commune (13,5%). Parmi les néonicotinoïdes présents dans le pollen collecté par les abeilles en juin, seuls 3% proviennent du colza : 97% proviennent des fleurs sauvages. En général, une concentration moyenne de néonicotinoïdes de 0,56 ng/g de pollen a été enregistrée (la dose sub létale qui pourrait générer des effets négatifs sur la colonie est considérée comme étant d'environ 5,31 ng/g pour le thiaméthoxame et 2,05 ng/g pour la clothianidine). Dans le pollen collecté en août, la concentration de néonicotinoïdes est réduite à 0,2 ng/g. On estime que 71,8 ng de néonicotinoïdes par jour entrent dans la ruche en juin et 11,1 ng par jour en août. Cette recherche confirme que la contamination environnementale est répandue, que les molécules se déplacent et se concentrent dans les plantes sauvages. Ainsi, l'exposition aux substances nocives pendant toute la durée de vie à de faibles concentrations est sous-estimée, et il est difficile d'évaluer les effets sur les pollinisateurs sauvages. Les fleurs sauvages, en raison du niveau élevé de contamination diffuse, peuvent présenter un plus grand risque pour les abeilles que les cultures.

En 2014, aux États-Unis, entre 79% et 100% des 36,6 millions d'hectares de maïs et entre 34% et 44% des 33,8 millions d'hectares de soja ont été plantés avec des semences contenant des néonicotinoïdes.³⁷⁰ La taille des zones agricoles où sont distribuées les substances toxiques donne une idée de l'ampleur de cette contamination généralisée : des millions d'hectares. C'est précisément en raison des grandes quantités de pesticides distribuées, même avec des graines, que les plantes sauvages sont contaminées.

Aux États-Unis, le pollen récolté par les abeilles dans les zones non agricoles est contaminé par 29 des 65 pesticides recherchés, tels que (par ordre décroissant d'occurrence) les fongicides (l'azoxystrobine est trouvée dans 93,3% des échantillons et la trifloxystrobine dans 63,3% des échantillons), les herbicides (le métolachlore est trouvé dans 83,3% des échantillons), les pyréthroïdes (prallethrine et phénothrine), les carbamates, les néonicotinoïdes et les organophosphates.³⁷⁰ Dans le pollen prélevé sur des plantes sauvages cultivées dans des zones non agricoles, les pesticides sont contenus jusqu'à une concentration de 317 parties par milliard. Dans les ruches situées dans des zones non agricoles, cependant, 7,9% du pollen était du soja et 0,4% du maïs.³⁷⁰ Dans le pollen collecté auprès d'abeilles situées à proximité de champs de maïs dont les semences n'ont pas été traitées, 31 pesticides ont été trouvés, à une concentration maximale de 736 parties par milliard. Dans le pollen collecté auprès d'abeilles situées à proximité de champs de maïs, dont les graines avaient été traitées avec des pesticides, 28 pesticides ont été trouvés à une concentration maximale de 1.453 parties par milliard.³⁷⁰ Dans ce dernier cas, les concentrations les plus élevées ont été trouvées, même si la plupart du pollen provenait de plantes non cultivées (moins de 21% du pollen provenait du maïs et moins de 4,4% du soja). Les conclusions intéressantes de cette recherche sont les suivantes :

- des mélanges complexes et des concentrations élevées sont enregistrés dans le pollen de plantes sauvages ;
- bien que les ruches aient été placées près de champs cultivés, les abeilles préfèrent récolter la majeure partie de leur pollen dans les fleurs sauvages.

Les zones choisies pour cette étude sont représentatives d'une zone géographique des États-Unis, où l'on cultive principalement du maïs et du soja. Bien que les abeilles aient pu visiter les champs de maïs et de soja, elles ont préféré collecter d'autres types de pollen dans les trois zones d'étude, y compris les zones agricoles ; dans ces dernières, les cultures représentaient plus des deux tiers de la surface, dans un rayon de 2 km. Parmi les pesticides les plus fréquemment retrouvés, on trouve des fongicides qui sont utilisés, comme les néonicotinoïdes, sur les graines avant le semis (azoxystrobine et trifloxystrobine). On peut raisonnablement supposer que les

abeilles ingèrent 65 mg de pollen au cours de leur vie et qu'elles entrent en contact avec 1 g de pollen par jour : la quantité de néonicotinoïdes à laquelle les abeilles sont exposées par ingestion et par contact par le biais du pollen constitue un risque. Les effets synergiques et additifs sont également facilement prévisibles et peuvent accroître les effets aigus et chroniques. Par exemple, la présence simultanée du fongicide propiconazole et de néonicotinoïdes augmente considérablement le risque de mortalité, en raison d'effets additifs et synergiques. Les fongicides ont également été associés à une probabilité accrue d'enregistrer des parasites (par exemple *Nosema ceranea*). Malheureusement, ce mélange de poisons nuit également aux insectes sauvages et aux autres êtres vivants, y compris les humains.

Les pesticides utilisés dans le même champ les années précédentes, ainsi que ceux utilisés dans les champs voisins, ne sont généralement pas pris en compte. Par exemple, l'imidaclopride se déplace dans le sol et peut être retrouvé un an après le traitement. On trouve encore des organochlorés et d'autres insecticides à des milliers de kilomètres de l'endroit où ils ont été utilisés et des décennies après leur dernière utilisation enregistrée. Une fois dans la chaîne alimentaire et dans les flux biochimiques de la biosphère, les molécules persistantes se déplacent rapidement et peuvent se bioconcentrer.

Cette recherche montre que l'évaluation sur le terrain peut conduire à des résultats erronés, car les zones non traitées et non agricoles peuvent également constituer une source importante de poisons, comparable aux zones cultivées. Par conséquent, la comparaison des résultats entre des colonies situées à proximité de champs cultivés ou de zones où l'agriculture est moins intensive ne permet pas de discriminer le risque réel. Cette stratégie d'évaluation, parfois maniée avec amateurisme, ne permet pas de mesurer des effets tels que ceux sur le système immunitaire, le système endocrinien, la fertilité ou le comportement (c'est-à-dire le système nerveux).

Certaines cultures traitées avec des pesticides tels que les néonicotinoïdes, pour lesquelles la règle agronomique de la rotation, c'est-à-dire l'alternance avec d'autres cultures, devrait être appliquée, ne sont pas alternées avec d'autres plantes ; la rotation des cultures est une bonne pratique agronomique et écologique, mais lorsqu'elle n'est pas effectuée, les pesticides s'accumulent (par exemple, le maïs est semé de manière répétée sur la même terre pendant des années). Après la culture de plantes traitées à l'imidaclopride, on peut trouver des concentrations supérieures à 10 ppb pendant les 12 mois suivants, et l'année suivante, supérieures à 4 ppb.⁵⁵³

Les plantes sauvages et cultivées ont des capacités nectarifères différentes. Dans les meilleures conditions, la phacélie (*Phacelia tanacetifolia*), le sarrasin (*Fagopyrum esculentum*) ou le colza peuvent produire plus de 300 kg de miel par hectare. Certaines plantes sauvages permettent également une production abondante de miel (*Taraxacum officinale*, *Centaurea cyanus*). Les abeilles peuvent être exposées aux substances toxiques présentes dans des dizaines d'espèces différentes, tant cultivées que sauvages. Pour contrôler le niveau de risque, une recherche menée en Pologne a examiné la présence de 142 insecticides dans 41 échantillons de plantes nectarifères, au cours des mois entre mai et juillet 2017 (500 g de fleurs ont été collectés pour chaque plante de colza, phacélie, sarrasin, pissenlit commun et bleuet).¹²²² Douze insecticides sont détectés dans 19 des 41 échantillons de fleurs (acétamipride, chlorantraniliprole, chlorpyrifos-éthyl, clothianidine, cyperméthrine, deltaméthrine, diazinon, diméthoate, fenpyroximate, imidaclopride, ométhoate et thiaclopride) ; 17% des fleurs contiennent 2 ou 3 insecticides simultanément. Des insecticides néonicotinoïdes ont été trouvés dans 7 échantillons et à une concentration maximale de 498 ng/g (thiaclopride). Dans les fleurs sauvages situées à proximité des champs de maïs, les néonicotinoïdes peuvent être enregistrés à une concentration d'environ 10 ng/g. Les résidus les plus fréquemment trouvés en Pologne (dans 4 échantillons de fleurs chacun) étaient la deltaméthrine, le diméthoate et son métabolite l'ométhoate (avec la concentration la plus élevée de 49 ng/g).¹²²² Le diméthoate est présent dans les fleurs de colza mais son utilisation dans cette culture est interdite. Huit des douze matières

actives mesurées dans les fleurs nectarifères sont classées comme très dangereuses (toxicité aiguë ou DL₅₀ par voie orale ou par contact inférieure à 2 µg/abeille pour la deltaméthrine, le diméthoate, l'ométhoate, le chlorpyrifos-éthyl, la cyperméthrine et le thiaclopride). Plus de 47% des champs agricoles enregistrent la présence d'insecticides dangereux dans les plantes nectarifères (100% des fleurs de colza testées contenaient des insecticides, alors qu'ils n'ont pas été détectés dans le sarrasin). Cette étude confirme que les pollinisateurs tels que les abeilles domestiques sont exposés à de nombreux produits chimiques mortels par le biais du pollen et du nectar.

En Suisse (2015), 700 échantillons de sol ont été analysés pour quantifier les concentrations de cinq insecticides néonicotinoïdes (imidaclopride, clothianidine, thiaméthoxam, thiaclopride, acétamipride).³⁶⁶ Les résultats sont alarmants : 93% des échantillons de sols issus de l'agriculture biologique contiennent au moins un néonicotinoïde ; 80% des sols des zones d'intérêt écologique contiennent au moins une des 5 molécules recherchées (21% contiennent au moins 2 néonicotinoïdes) ; 100% des échantillons de sols occupés par l'agriculture conventionnelle contiennent ces poisons (imidaclopride à une concentration maximale de 29,72 parties par milliard ou ppb et clothianidine à une concentration maximale de 20,95 ppb ou millionième de gramme par kilogramme).³⁶⁶ 46% des sols issus de l'agriculture conventionnelle contiennent au moins 2 insecticides néonicotinoïdes. Les concentrations de pesticides trouvées peuvent générer des effets négatifs sur les invertébrés. Dans les champs cultivés selon des méthodes d'agriculture conventionnelle ou intégrée, on a constaté qu'entre 5,3% et 8,6% des 94 espèces d'invertébrés (arthropodes et annélides) présentes dans le sol sont exposées à des doses létales de clothianidine, et qu'entre 31,6% et 41,2% des 94 espèces sont exposées à des doses ayant des effets sublétaux. Même dans l'agriculture biologique, au moins entre 1,3% et 6,8% des invertébrés utiles du sol sont exposés à des doses sublétales. Les concentrations enregistrées dans le sol ne sont pas létales pour les 12 espèces considérées comme nuisibles pour les agriculteurs. Ces molécules sont également présentes dans les plantes de ces régions et dans 14 des 16 échantillons de semences utilisées en agriculture biologique, à une concentration maximale de 81,9 ppb : la clothianidine et l'imidaclopride ont été mesurées dans 62,5% des semences utilisées en agriculture biologique. Ces poisons sont également présents dans les plantes utilisées dans l'agriculture biologique. L'étude montre qu'il existe une contamination généralisée capable de nuire à des espèces utiles non ciblées telles que les invertébrés du sol et les oiseaux.³⁶⁶ Les espèces utilisées en agriculture biologique pour lutter contre les parasites des plantes sont également dangereusement contaminées. En conclusion, les sols et les plantes en Suisse sont contaminés par les néonicotinoïdes, ce qui entraîne une exposition chronique avec des effets létaux, sublétaux, additifs et synergiques. Les bombes chimiques à effet différé sont systématiquement distribuées dans l'environnement ; elles peuvent passer dans la chaîne alimentaire et dans l'eau, et s'accumuler. Afin de protéger la biodiversité, il pourrait être proposé, en plus de l'interdiction de l'utilisation de ces molécules, de laisser une fraction de la surface cultivée en friche, avec des haies, des prairies et des plantes sauvages. Pour y parvenir, les agriculteurs pourraient bénéficier d'incitations, comme c'est le cas en Suisse ou en Norvège.³⁶⁶

La libération de molécules telles que les insecticides néonicotinoïdes dans l'environnement entraîne des concentrations dangereuses dans l'eau, les sédiments et le miel, avec des effets toxiques et sublétaux sur les oiseaux et autres organismes sauvages. Les néonicotinoïdes se retrouvent dans le sang des oiseaux insectivores, des rapaces diurnes et des hiboux, dans le foie des oiseaux granivores tels que la dinde sauvage (*Meleagris gallopavo*) et dans les plumes des moineaux domestiques (*Passer domesticus*).¹²¹⁴ La concentration d'insecticides néonicotinoïdes chez les oiseaux vivant à proximité de champs traités est plus élevée, comme on pouvait s'y attendre.

Des recherches menées au Canada, entre les années 2015 et 2018, ont détecté des insecticides dans le liquide cloacal de certaines espèces d'oiseaux qui se nourrissent de nectar comme les abeilles domestiques : les colibris. ¹²¹⁴ Les insecticides ont été mesurés dans les oiseaux colibris, le miel, l'eau et les sédiments sur plusieurs sites canadiens où ils étaient principalement utilisés dans la culture des myrtilles. On a examiné le liquide cloacal des espèces d'oiseaux suivantes : colibri à gorge rouge (*Selasphorus rufus*), colibri d'Anna (*Calypte anna*), colibri calliope (*Selasphorus calliope*), colibri à gorge noire (*Archilocus alexandri*) et colibri à gorge rubis (*Archilocus colubris*). Les insecticides suivants ont été recherchés : imidaclopride, clothianidine, acétamipride et flupyradifuron. Le flupyradifuron est un insecticide (buténolides) autorisé au Canada en 2015 pour les baies, les légumes et les céréales. Dans 26,5% des 49 échantillons de colibris en 2017 et 11 en 2018, les molécules recherchées sont : l'imidaclopride (jusqu'à 0,9 ng/mL), la clothianidine (0,29 ng/mL), l'acétamipride (1,2 ng/mL) et le flupyradifuron (4,6 ng/mL). ¹²¹⁴ Le miel était également contaminé par les insecticides testés : jusqu'à 3,1 ng/mL d'imidaclopride, 3,2 ng/mL de clothianidine et 2,2 ng/mL de flupyradifuron. L'eau est contaminée par l'imidaclopride (jusqu'à 1.459 ng/L) et la clothianidine (jusqu'à 49 ng/L) ; les sédiments : entre 0,36 et 5,66 ng/g (matière sèche) pour l'imidaclopride, entre 0,3 et 0,88 ng/g (matière sèche) pour la clothianidine, tandis que l'acétamipride est mesurée à une concentration de 0,73 ng/g (matière sèche) sur un site. Sur quatre des onze sites contrôlés, les eaux enregistrent des concentrations de néonicotinoïdes (imidaclopride) considérées comme dangereuses (supérieures à 200 ng/L ; des concentrations de 130 ng/L peuvent facilement être mesurées dans les eaux de surface). ¹²¹⁴ Ces résultats confirment la diffusion des molécules dangereuses tant dans la composante abiotique (eau et sédiments) que dans la composante biotique (oiseaux), de sorte que des effets sommateurs et multiplicateurs sont prévisibles, qui sont inconnus mais doivent nous inquiéter.

LES PESTICIDES SONT PERSISTANTS

La persistance des pesticides génère de nombreux effets négatifs tels que la contamination à long terme d'espèces non ciblées. Une étude réalisée en Inde a examiné la persistance de la toxicité de certains pesticides utilisés dans la culture du tournesol. Les fleurs de tournesol peuvent produire à la fois du pollen et du nectar, qui sont utilisés par de nombreux insectes : hyménoptères (comme les abeilles), diptères (mouches), lépidoptères (papillons) et coléoptères. ⁶⁶³ L'utilisation d'insecticides et d'autres pesticides expose de nombreuses espèces d'insectes à des substances nocives. Pour étudier la persistance de différentes molécules, des abeilles (*Apis mellifera*) ont été exposées à six pesticides utilisés aux doses maximales recommandées (*pulvérisation* sur les feuilles de plantes de tournesol en fleur). Les molécules insecticides ont été distribuées lorsqu'au moins 50% des fleurs de tournesol étaient en pleine floraison : azadirachtine (utilisée en agriculture biologique et extraite des graines de l'arbre Neem ou *Azadirachta indica*), diméthoate (phosphoranique), cyperméthrine (pyréthroïde), fipronil, imidaclopride (néonicotinoïde) et indoxicarb. ⁶⁶⁴ Des taux de mortalité élevés ont été enregistrés même neuf jours après le traitement, qui a été effectué dans les conditions d'utilisation des pesticides recommandées par les fabricants. En particulier, la persistance de la toxicité pour les abeilles s'est avérée être, par ordre décroissant : fipronil > imidaclopride > cyperméthrine > diméthoate > indoxacarbe > azadirachtine. ⁶⁶³ Cette recherche montre que les insectes qui visitent les fleurs de tournesol sont exposés à des doses létales d'insecticides même neuf jours après la distribution. D'autres études menées sur des périodes plus longues ont montré que, par exemple, la toxicité du fipronil est élevée même 28 jours après le traitement. ⁶⁶³ Le fipronil et l'imidaclopride se sont avérés avoir la toxicité résiduelle la plus élevée et donc les

effets indésirables les plus persistants. Tous les ingrédients actifs testés se sont révélés très toxiques pour les abeilles d'élevage, y compris l'azadirachtine.

La détection de pesticides interdits dans de nombreuses matrices et l'enregistrement de la présence de substances actives dans l'eau potable à des concentrations élevées conduisent rarement à des mesures sérieuses et efficaces. La législation pertinente (règlement CE n° 1107/2009) stipule que "*une substance active, un phytoprotecteur ou un synergiste n'est approuvé que s'il n'est pas considéré comme une substance persistante, bioaccumulable ou toxique.*".²⁶⁵ Une substance, telle que l'ingrédient actif d'un pesticide, est considérée comme persistante en fonction de sa demi-vie, qui indique le nombre de jours nécessaires à la molécule pour se décomposer, se dégrader ou se transformer en quelque chose d'autre en réduisant la concentration initiale de 50% (la dégradation peut être favorisée par l'exposition à la lumière, le métabolisme ou les micro-organismes du sol). Ce concept ne tient toujours pas compte du fait bien connu que de nombreux dérivés (par exemple certains métabolites) sont aussi dangereux ou plus dangereux que les produits de départ, sont plus persistants que les produits de départ et peuvent présenter des effets indésirables avec de nouveaux mécanismes d'action et sur des organismes non ciblés. Pour en revenir à la réglementation européenne, *une substance, telle que l'ingrédient actif d'un pesticide, est considérée comme persistante si :*

- *la demi-vie dans l'eau de mer est supérieure à 60 jours,*
- *la demi-vie dans l'eau douce ou estuarienne est supérieure à quarante jours,*
- *la demi-vie dans les sédiments marins est supérieure à cent quatre-vingts jours,*
- *la demi-vie dans les sédiments d'eau douce ou estuariens est supérieure à 120 jours,*
- *la demi-vie dans le sol est supérieure à 120 jours.*

Selon la législation, si une substance ou ses métabolites tout aussi dangereux restent dans l'environnement tel que le sol (demi-vie de plus de trois mois), ils ne doivent pas être autorisés.⁵⁵³ Afin de mettre en évidence l'incapacité de faire respecter les règles élaborées pour notre protection, il est utile d'examiner la demi-vie dans le sol de certaines substances actives des pesticides :⁴⁴⁷

- Pour l'imidaclopride, la demi-vie de la concentration dans le sol peut atteindre 1.230 jours, soit plus de 3 ans (entre 40 et 997 selon d'autres estimations).⁶⁷⁸ Dans les documents officiels accompagnant l'imidaclopride, des temps de demi-vie compris entre 188±25 et 249±40 jours sont indiqués, calculés dans deux types de sol différents, ce qui est en tout cas plus long que les 120 jours requis par la législation.^{359, 553}
- Pour le dinotefuran, c'est environ 138 jours.⁶⁷⁸
- Pour la clothianidine, c'est plus de 500 jours dans l'eau et entre un et trois ans dans le sol (entre 148 et 1.155 jours).^{368, 442, 678}
- Pour l'aldrine, c'est au moins 365 jours.
- Pour le chlordane, il faut compter au moins 350 jours.
- Pour le DDT, c'est au moins 2.000 jours. Certaines études indiquent que le DDT et ses métabolites (DDE et DDD) peuvent rester dans le sol pendant plus de 40 ans.⁵⁴¹
- Pour la dieldrine ou l'hexachlorobenzène, il faut compter au moins 1.000 jours.
- Pour le fénarimol, c'est au moins 360 jours.
- Pour l'heptachlore, c'est au moins 250 jours.
- Pour l'imazalil, c'est au moins 150 jours.
- Pour le monuron, c'est de 170 jours.
- Pour le paraquat, c'est 1.000 jours.
- Pour la propazine, c'est 135 jours.
- Pour le tebuthiuron, c'est de 360 jours.
- Pour le thiabendazole, c'est de 403 jours.
- Pour le bénomyl, c'est de 240 jours.⁴⁴⁸

Cette connaissance et le bon sens suggèrent que, pour de nombreux pesticides, leur enregistrement et leur utilisation devraient être exclus parce qu'ils sont persistants. Les faits confirment que la force économique inhérente à la vente de pesticides est bien plus grande que celle des États et des gouvernements supranationaux (par exemple en Europe) pour défendre la santé et l'environnement.

RÉSISTANCE AUX PESTICIDES

La résistance aux effets létaux des pesticides est connue depuis longtemps : depuis 1940, plus de 1.000 espèces ont enregistré l'apparition d'une résistance à au moins une substance active. L'augmentation de ce phénomène affecte la biodiversité et génère des problèmes supplémentaires pour la production alimentaire et la santé.

Depuis les années 1980, au moins 520 espèces d'insectes et d'acariens nuisibles ont été identifiées comme étant devenues résistantes aux pesticides, de même qu'au moins 150 mauvaises herbes.⁵⁰² En 1970, la résistance à l'herbicide atrazine avait déjà été enregistrée pour au moins une mauvaise herbe. L'un des premiers rapports faisant état de plantes devenant résistantes à l'herbicide glyphosate remonte à 1996 ; en 2011, au moins 19 espèces de mauvaises herbes ont été signalées comme étant capables de tolérer cette dangereuse molécule.⁷⁶¹ Dans le monde entier, en 2014, 432 plantes ont été enregistrées comme étant devenues résistantes à au moins un herbicide. Cette tolérance génère des dépenses énormes : dans le cas du coton, dans les années 1980, ce coût était estimé entre 45 et 120 USD par hectare et par an. L'émergence d'agents pathogènes résistants aux pesticides augmente les coûts de 10 à 25% de ceux générés par l'utilisation des pesticides eux-mêmes.⁵⁰²

Certains des acaricides les plus utilisés par les apiculteurs ont enregistré le développement d'acariens résistants.⁸⁵⁹ Depuis plus de 10 ans, on observe que le pyréthroïde tau-fluvalinate est inefficace contre l'acarien *Varroa* dans plusieurs endroits de la planète. Les populations d'acariens résistants à un autre acaricide utilisé par les apiculteurs, le coumaphs, sont connues depuis au moins 20 ans (depuis 2001).⁶⁰² Une autre molécule, l'amitraz, est également connue pour avoir sélectionné des acariens résistants, malgré le fait que son utilisation en apiculture soit interdite dans de nombreux pays depuis des années (aux USA depuis 1994).

LA DÉSINFORMATION EST MORALEMENT INACCEPTABLE

Les règles économiques et financières qui ont temporairement dépassé les règles biologiques et physiques produisent des désastres environnementaux et des maladies. La science joue un rôle clé dans ce processus car elle est en partie instrumentalisée, manipulée ou conçue pour maintenir des conditions favorables à l'industrie.³³⁴ Le monde scientifique doit trouver la force de se détacher complètement des influences délétères qui sapent ses fondements. Au fil du temps, les entrepreneurs de l'industrie agrochimique ont mis en œuvre de nombreuses stratégies déloyales, inéquitables mais fructueuses, dans le but d'obtenir des résultats économiques. Il existe une littérature intéressante sur ce sujet qui dénonce certains problèmes.^{260, 280, 307}

Le risque chimique généré par la pollution et en particulier par l'utilisation de poisons tels que les pesticides est sous-estimé tant au niveau de ses effets sur les écosystèmes (par exemple sur les pollinisateurs) que sur la santé humaine.⁶⁸² Le manque d'attention portée aux risques est facilité par la désinformation. Le processus déformé de la désinformation est pire que de ne pas informer du tout. La manipulation de l'information est devenue une nouvelle arme de désinformation massive, largement renforcée par des outils omniprésents tels que la télévision et internet. Les industries qui produisent et commercialisent les pesticides appliquent diverses stratégies de communication pour nier les preuves, détourner l'attention et instiller le doute.^{261,}

⁷²² Elles investissent dans des campagnes de désinformation qui utilisent certains thèmes, qui sont les chevaux de bataille des campagnes publicitaires, pour raconter des histoires déformées. Plusieurs sujets pourraient être recommandés pour être développés afin de favoriser les intérêts commerciaux. Certains d'entre eux sont suggérés.

- *Les pesticides sont nécessaires pour nourrir une planète de plus en plus affamée.* Aux États-Unis, l'utilisation d'insecticides a été multipliée par 10 au cours des 50 années écoulées depuis la Seconde Guerre mondiale et les pertes de récoltes ont plus que doublé. La culture du maïs peut servir de modèle pour dissiper ce mythe. Aux États-Unis, l'utilisation d'insecticides organophosphorés a été multipliée par plus de 1.000, mais les pertes d'insectes sont passées de 3,5% à 12%.
- *Les agriculteurs n'ont aucune alternative à l'utilisation des pesticides.* La vérité est qu'il existe de nombreuses alternatives à l'utilisation des pesticides, comme la rotation des cultures, l'éradication mécanique des mauvaises herbes, la lutte biologique, les cultures intercalaires, les méthodes d'agriculture durable ou moins polluantes (par exemple l'agriculture biologique). Le grand défi de cette époque est de construire une nouvelle culture agronomique indépendante des multinationales de la chimie.
- *Les pesticides ne sont pas dangereux.* Ce sujet a été abordé en détail ci-dessus, mais on peut encore souligner que dans de nombreux pays du monde, les plaintes déposées par les apiculteurs auprès des autorités devraient être suffisantes pour déclencher une action concrète.
- *L'interdiction de l'utilisation de certains pesticides tels que les néonicotinoïdes ne repose pas sur des preuves scientifiques.* Malheureusement, il aurait suffi d'écouter les plaintes des apiculteurs du monde entier pour justifier l'interdiction de certaines pratiques agricoles non durables, au lieu d'attendre une confirmation scientifique. En raison de cette attente, des mesures ont été prises tardivement, comme l'interdiction de l'utilisation du DDT ou des néonicotinoïdes. Malgré les nombreux rapports d'empoisonnement d'insectes par des apiculteurs (comme ceux signalés en raison des dommages causés par les néonicotinoïdes utilisés dans les champs de maïs et de tournesol en France en 1994, en Italie en 2008 ou en Allemagne en 2009), l'évaluation scientifique a été longue et coûteuse.
- *Les effets des pesticides appartenant à la même catégorie, comme les différents principes actifs des néonicotinoïdes, ne doivent pas être considérés comme similaires.* Cette stratégie tend à sous-estimer les effets additifs, sublétaux et synergiques.
- *Les nouvelles molécules sont également meilleures car elles sont utilisées en plus petites quantités.* Les molécules interdites peuvent être remplacées par d'autres ayant une structure chimique similaire et un mécanisme d'action équivalent. L'histoire nous a appris que les ingrédients actifs des pesticides ont toujours été remplacés par d'autres plus toxiques en l'espace de 60 ans, de sorte que des quantités plus faibles peuvent être utilisées. Cependant, au fil du temps, on constate une tendance constante à l'augmentation plutôt qu'à la réduction de l'utilisation de ces substances toxiques, et la toxicité globale équivalente a certainement augmenté.
- *Les concentrations enregistrées dans l'environnement ne sont pas dangereuses.* Cette déclaration ne tient pas compte des informations multiples et des effets cumulatifs, des

métabolites ou des substances qui peuvent se déplacer dans la biosphère et dans un organisme. L'analyse des risques sous-estime les dommages causés aux enfants, aux femmes, aux personnes plus faibles et les effets à long terme.⁵⁷⁰ Il en va de même pour les animaux tels que les insectes pollinisateurs. Dans de nombreux cas, l'histoire nous a appris que le danger estimé a été sous-estimé. On peut rappeler que les doses de principes actifs présentes dans le pollen et le nectar sont importantes et dangereuses. L'exposition aux pesticides utilisés dans les semences a également été sous-estimée, alors que de nombreux apiculteurs n'ont pas manqué de souligner leurs effets dévastateurs.

- *L'utilisation des meilleures pratiques dans la distribution des pesticides réduit tellement le risque que nous n'avons plus à nous en soucier.* Ce message est répété de différentes manières et stratégies. Par exemple, afin de minimiser les rapports faisant état de la mortalité des abeilles due à l'ensemencement de graines traitées avec des pesticides systémiques et à longue durée de vie, l'utilisation de semoirs produisant moins de poussière a été proposée. C'est une solution inefficace étant donné que ces molécules sont persistantes, bioaccumulables, mobiles et très toxiques. Ces molécules sont distribuées sans évaluation des seuils économiques d'intervention. Dans ce cas, les plantes seront toxiques tout au long de leur vie et certaines substances continueront à avoir des actions biologiques négatives dans le sol et dans la chaîne alimentaire pendant des années (heureusement, nous n'utilisons pas d'armes chimiques capables de *stériliser la biosphère*, c'est-à-dire capables d'exterminer toutes les formes de vie, nous nous contentons d'en endommager la plupart en effectuant la pasteurisation).
- Si l'on respecte *une utilisation correcte*, les risques sont réduits en dessous des seuils inacceptables, c'est-à-dire que les substances deviennent inoffensives. La responsabilité est ainsi transférée aux utilisateurs.
- *Les évaluations scientifiques faites par les autorités sont basées sur des données non fiables ou non confirmées.* Ce message est soutenu par certaines parties prenantes qui ont un conflit d'intérêts évident. Malheureusement, la chronique enregistre constamment le contraire. Les études d'évaluation toxicologique soumises par les entreprises, au stade de l'autorisation préalable à la mise sur le marché, sont secrètes et les publications scientifiques sont utilisées, dirigées par des chercheurs ayant un conflit d'intérêts évident.
- *C'est la dose qui fait le poison.* Ce point de vue repose sur l'hypothèse que rien n'est un poison, mais que tout peut devenir un poison si la dose est suffisante. En dessous d'un seuil, on peut être en sécurité. En réalité, certaines substances présentent des effets qui ne peuvent être mesurés à des concentrations plus élevées, comme les perturbateurs endocriniens et les substances cancérigènes. C'est en partie à cause de cette mauvaise interprétation qu'est né le concept de dose journalière admissible (DJA). La DJA est la quantité d'une substance que l'on peut théoriquement absorber au cours d'une vie sans aucun risque pour la santé. Comme on peut le constater, il s'agit d'une évaluation politique et d'une exagération. Le risque zéro n'existe pas, surtout lorsqu'on est exposé à des poisons tels que les insecticides ou autres molécules neurotoxiques, cancérigènes et perturbateurs endocriniens. Ce n'est qu'en ne prenant pas de substances destinées à tuer des êtres vivants que l'on peut être sûr de ne pas générer d'effets négatifs. Cette façon d'aborder le problème fait partie de la stratégie consistant à laisser à des parties extérieures aux intérêts commerciaux le soin de démontrer le danger chronique (surtout

à petites doses prises occasionnellement ou constamment dans le temps), les effets sublétaux, additifs et synergiques. A cet égard, il est utile de rappeler le cas du parathion, pour lequel une dose journalière acceptable de 0,004 mg par kilogramme de poids corporel a été évaluée. Selon cette évaluation des risques, un homme de 70 kg aurait théoriquement pu ingérer 0,28 mg par jour pendant toute sa vie sans connaître de problèmes de santé : en 2003, il a été interdit en Europe, alors qu'il était trop tard.²⁸⁰ Pour estimer la dose journalière admissible, on calcule la consommation moyenne d'un aliment dans la population d'un État et on examine les concentrations de la substance toxique présente dans l'aliment (par exemple, le parathion dans l'huile d'olive). Enfin, l'évaluation toxicologique est basée sur un homme de 70 kg. Cette méthode est discutable car elle n'est pas très protectrice de la santé et offre la possibilité de faire varier l'évaluation toxicologique en fonction des habitudes alimentaires et des concentrations dans les aliments. Précisément parce que cette méthodologie se prête à une interprétation facile, il s'ensuit que, bien que tous appliquent les mêmes protocoles d'évaluation des risques, chaque pays décide d'une limite de concentration maximale pour différents aliments qui est différente des autres (dans certains cas, il existe même des différences entre les territoires d'un même pays).

Malheureusement, les êtres vivants sont exposés tout au long de leur vie à de petites doses de poisons dans des mélanges complexes et imprévisibles présents dans l'air, l'eau, la nourriture, les vêtements, les médicaments et les cosmétiques. La combinaison de nombreuses molécules à petites doses produit des effets multiplicatifs souvent inconnus et difficiles à prévoir à l'avance. De nombreuses substances, comme certains pesticides, sont des perturbateurs endocriniens, et peuvent donc avoir des effets dévastateurs à très faible dose. Une étude réalisée aux États-Unis (*Center for Disease Control and Prevention*) a déterminé la présence dans l'organisme des Américains de la plupart des 212 substances testées, dont 44 pesticides : on les a retrouvés dans le liquide amniotique, l'urine, le sang et le lait maternel. Un insecticide, le DDT, interdit aux États-Unis depuis 1972, a été retrouvé dans 85% des personnes testées.

En conclusion, le principe selon lequel c'est la dose qui fait d'une substance un poison ne s'applique certainement pas aux pesticides, qui sont des perturbateurs endocriniens et aussi des mutagènes, c'est-à-dire des pesticides potentiellement cancérigènes. En fait, les molécules qui interfèrent avec les plus de 50 hormones du corps humain peuvent agir à des doses très faibles : parties par million ou parties par milliard. Cette action négative se produit également dans les hormones d'autres animaux tels que les insectes. Les hormones et leurs interférents ne suivent pas les règles de la toxicologie utilisée pour examiner le danger des pesticides, qui est donc inefficace pour mesurer ces effets.

- *Les autorités nous protègent suffisamment.* Un point faible dans la relation entre les secteurs public et privé est bien représenté par l'expression "*portes tournantes*". Les politiciens (mais aussi de nombreux gestionnaires publics tels que ceux du secteur de la santé) sont autorisés à travailler simultanément ou alternativement dans les secteurs public et privé, ce qui crée des conflits d'intérêts flagrants. De cette manière, de véritables crimes sont encouragés au détriment de la communauté et des services indispensables de la nature. Cette situation de conflit exprime également une autre déviation : la loi est interprétée pour les amis et appliquée aux ennemis.
- *Les plantes génétiquement modifiées et autres organismes génétiquement modifiés réduiront la dépendance à l'égard des pesticides.* La plupart des entreprises qui vendent des plantes génétiquement modifiées sont des fabricants de pesticides. Plus de 80% des plantes génétiquement modifiées cultivées dans le monde sont conçues pour tolérer une

utilisation accrue de pesticides. En conséquence, certains pesticides, ceux qui font l'objet d'une modification entraînant une plus grande tolérance des effets phytotoxiques sur les cultures (par exemple, maïs, soja, coton), sont utilisés en plus grandes quantités (par exemple, les herbicides). Les plantes qui produisent elles-mêmes des insecticides se sont également avérées très critiques. Pour donner un exemple, le coton cultivé en Inde, qui représente 50% de la production mondiale de cette matière première, a vu sa productivité diminuer et le coût des pesticides augmenter, malgré la modification génétique qui permet de produire dans les tissus les toxines du micro-organisme du sol à action insecticide (*Bacillus thuringiensis*). En Inde, ces faits ont conduit à une augmentation des suicides d'agriculteurs en raison de leurs dettes.

Il est également important de réfléchir à une autre question essentielle. En 2009, aux États-Unis, 93% des plants de soja et 80% des plants de maïs cultivés ont été génétiquement modifiés pour être résistants à l'herbicide glyphosate. Les mauvaises herbes sont devenues résistantes à cet herbicide, de sorte que les plantes génétiquement modifiées ne présentent pas les avantages proposés [des insectes devenus tolérants aux toxines insecticides (*Bacillus thuringiensis*) ont également été enregistrés, comme cela s'est produit pour le maïs]. Pour surmonter cet obstacle, les entreprises de plantes transgéniques ont proposé des semences présentant une résistance simultanée au glyphosate et à un autre herbicide : le dicamba. Le dichamba est principalement absorbé par les feuilles, mais aussi par les racines, et est transporté dans toute la plante par la circulation lymphatique.²⁶² Cette molécule est très dangereuse et a également provoqué des dégâts dans des champs non traités. Les géants de l'*agribusiness* sont confrontés à des milliers de plaintes d'agriculteurs lésés, à des procès intentés par plusieurs États et à un certain nombre de restrictions législatives qui, espérons-le, réduiront sa propagation.

Pour contrer la propagation des mauvaises herbes résistantes aux herbicides tels que le glyphosate, une autre catégorie de plantes génétiquement modifiées a également été produite, celles qui sont résistantes à un herbicide différent : le 2,4-D. Aux États-Unis, le maïs présentant cette nouvelle résistance a été approuvé en 2014, on peut donc s'attendre à une augmentation de l'utilisation de cet herbicide. Le maïs résistant à l'herbicide 2,4-D est également résistant au glyphosate. La résistance au 2,4-D a également été conférée au soja. Par conséquent, les plantes génétiquement modifiées entraînent une augmentation de l'utilisation du pesticide commercialisé par les mêmes entreprises qui ont créé les plantes transgéniques.

Il convient de rappeler que le glyphosate a été classé comme cancérigène probable pour l'homme, tandis que le 2,4-D est soupçonné d'être un perturbateur endocrinien et a été associé au cancer et à des problèmes de reproduction. L'utilisation en temps de guerre d'herbicides tels que le 2,4-D ou l'acide 2,4-dichlorophénoxyacétique pour détruire les cultures et affamer ainsi l'ennemi (par exemple par les Britanniques en Malaisie dans les années 1950 et plus tard par les États-Unis au Viêt Nam) est une triste réalité.²⁸⁰ Un message de conclusion de cette histoire est que les plantes rendues résistantes aux herbicides par modification génétique ont généré une augmentation de l'utilisation de l'arsenal chimique nuisible à notre santé. Par exemple, dans les champs de coton ou de soja résistants aux herbicides tels que le glyphosate, la quantité totale de pesticides utilisés a été multipliée par trois.¹⁷⁵ Une conséquence négative prévisible a été la sélection artificielle de plantes résistantes aux herbicides. Par exemple, le sorgho est devenu une super-mauvaise herbe, car il est devenu résistant au glyphosate et a infesté de vastes zones. Le risque est de tomber dans la tentation de combattre les super mauvaises herbes avec de nouveaux super pesticides. Cette stratégie conduit à une augmentation disproportionnée et inefficace de l'utilisation des poisons. En conclusion,

les plantes génétiquement modifiées ont été présentées comme une option pour réduire l'utilisation des pesticides, mais les informations dont nous disposons montrent exactement le contraire : la culture de plantes génétiquement modifiées résistantes aux herbicides a vu une augmentation des quantités distribuées.¹⁷⁵

- *Nous nous débarrassons des pesticides.* En effet, le marché des pesticides est en croissance constante et au moins 20% ne sont pas utilisés à des fins agricoles.
- *Les pesticides et/ou les plantes génétiquement modifiées sont une solution au changement climatique.* À l'heure actuelle, les applications technologiques de plantes capables de résister à la sécheresse, à la salinité ou à d'autres changements climatiques ne sont pas très répandues.
- *D'autres facteurs sont tout aussi ou plus responsables des problèmes enregistrés.* Avec cette stratégie, on tente de détourner l'attention et de la répartir sur de nombreux facteurs différents, souvent de moindre importance mais présentés avec une hiérarchie identique ou supérieure. Par exemple, la cause du cancer n'est pas la substance mais des facteurs génétiques, qui sont donc plus importants. L'attention peut aussi être détournée vers le comportement individuel (par exemple, des agriculteurs qui ne respectent pas les meilleures pratiques) ou les modes de vie.
- *De nouvelles recherches scientifiques plus approfondies sont nécessaires.* Le manque de connaissances est une justification trop souvent utilisée, même lorsqu'il existe des preuves suffisantes.⁸⁶⁹ Cette stratégie a été utilisée par l'industrie du tabac, l'industrie de l'amiante et est encore systématiquement appliquée aujourd'hui.^{260, 280} Malheureusement, même les organisations publiques faisant autorité dans le domaine attirent l'attention et les ressources avec ce type de message et retardent en même temps les actions nécessaires. En ce qui concerne les pollinisateurs et en particulier les causes du déclin des insectes, enregistré à l'échelle planétaire, la Société américaine d'entomologie (ESA) se prononce officiellement avec précisément ce type de message (12 février 2019) : nous ne disposons pas de preuves suffisantes pour justifier une action.³⁷⁴ Malheureusement, même les organisations qui font autorité bénéficient du financement (légal) de grandes entreprises, comme celles qui produisent des pesticides au profit, dans cet exemple, de l'American Entomological Society.³⁰⁷
- *L'investissement nécessaire à la conception d'un nouveau pesticide exige des garanties telles que le secret des résultats des tests éco-toxicologiques.* Cette allégation est souvent utilisée pour empêcher l'accès à l'information et pour promouvoir un manque de transparence dans les processus d'autorisation et de décision. Il est vrai que les investissements peuvent être importants mais les gains possibles sont énormes. La mise au point de l'imidaclopride a peut-être coûté 50 millions d'euros, mais en 1998, les ventes de cet insecticide rapportaient déjà plus de 409 millions d'euros par an (556 millions en 2007).⁵⁵³ Toute restriction de l'accès aux informations sur les risques, lorsqu'il s'agit de la santé de chacun, doit être interdite.
- *La toxicité mesurée chez les animaux nous permet de supposer qu'il n'y a pas de risque pour l'homme.* De nombreux aspects, tels que l'éventuelle susceptibilité accrue de l'homme à l'exposition à certaines substances dangereuses, sont superficiellement sous-estimés.

L'industrie agrochimique est bien soutenue par un arsenal de propagande capable d'orchestrer des campagnes de désinformation diaboliquement conçues. Des batailles médiatiques spéciales sont menées par des experts en recrutement contre des chercheurs qui ont publié des travaux gênants ou nuisibles pour l'entreprise. Les chercheurs indépendants peuvent être approchés de différentes manières : on leur propose des conseils et des financements, ou on les attaque directement avec des publications critiquant leurs résultats. ³⁰⁷

LE RÔLE DE LA SCIENCE POUR LA DÉMOCRATIE

Malheureusement, la science soutenue par de puissants intérêts économiques, qu'il est plus correct de qualifier dans de nombreux cas de *pseudo-science* ou plutôt de *science servile*, continue de renforcer la thèse selon laquelle il n'est toujours pas prouvé que les pesticides puissent être la cause de l'augmentation de la mortalité des abeilles et des insectes. Dans le cas de la mortalité des abeilles d'élevage, l'accent est mis sur une myriade de causes telles que les parasites, le climat ou les ennemis fantômes (dans ce dernier cas, les causes de la mort "soudaine" devraient encore être découvertes) ; cela devient une occasion de demander un financement pour retarder l'action évidente et urgente. L'utilisation de la science comme outil pour soutenir et défendre des intérêts commerciaux est bien documentée. L'industrie dicte et finance la recherche scientifique utilisée pour défendre les intérêts économiques. La littérature regorge de documents décrivant cette triste et honteuse chronique. ^{260,295, 372, 397, 569, 570, 680} L'art consiste à créer et à répandre le doute et à distribuer l'attention sur une myriade de facteurs beaucoup moins importants mais présentés selon des hiérarchies arbitraires. Il s'agit de campagnes de déformation et de tromperie délibérées de l'information. Dans certains cas, on peut parler de véritables mercenaires de la science, c'est-à-dire d'une science qui manque de conscience et d'impartialité. Des astuces peuvent être employées dans la méthode expérimentale ou dans l'interprétation statistique qui sont difficiles à détecter pour les non-experts. ⁵⁵⁷ Il s'agit donc de stratégies diaboliques qui, dans certains cas, ont été découvertes et dénoncées. ^{280, 372, 397} En effet, la recherche peut être menée de manière rusée avec l'intention de dissimuler et non de divulguer. Les laboratoires peuvent avoir des liens avec l'industrie en raison du financement de projets de recherche, de services de conseil ou d'autres pressions plus ou moins transparentes. Une formidable machine de désinformation organisée est mise en branle. L'industrie finance des centaines d'études et de projets de recherche qui visent à soutenir sa cause tout en semant la confusion, en détournant l'attention sur d'autres facteurs. On réduit le poids des publications indépendantes en occupant le champ de la littérature scientifique par de la littérature servile. Une campagne de désinformation est mise en œuvre et le doute est cultivé, l'un des piliers de la pseudo-science au service d'intérêts commerciaux. De plus, un lien est créé avec des experts de renommée internationale avec les avantages qui en découlent, notamment en cas de besoin. Dans certains cas, ceux qui sont censés être des experts sont en fait des experts dans d'autres domaines et ne sont donc pas en mesure de réaliser les évaluations qui leur sont demandées. ⁵⁵³ Les stratégies de désinformation sont très puissantes, elles ont d'ailleurs été utilisées par l'industrie du tabac ou pour cultiver le climatocépticisme. Certaines stratégies importantes sur lesquelles se joue la désinformation sont énumérées ci-dessous. ^{260, 280, 307, 553}

- Financer la recherche scientifique d'une manière qui alimente l'incertitude et le désaccord dans la littérature scientifique. La production scientifique financée par le monde industriel peut être très importante ; le cas de l'industrie du tabac est bien connu : plus de 6000 études financées entre 1950 et 1998, pour un investissement de plus de 300 millions de dollars. L'invasion de la littérature scientifique par des études financées par des fonds privés, qui ne sont pas nécessairement inintéressantes, affecte les chercheurs indépendants eux-mêmes. Une culture motivée par des objectifs entrepreneuriaux

spécifiques est générée. Le contraire de ce que la méthode scientifique devrait produire : créer des connaissances au-dessus des parties et de manière libre. L'une des stratégies les plus sophistiquées consiste à mélanger les ressources financières privées et publiques dans le but de stimuler la recherche publique. Cela présente l'avantage d'économiser de l'argent pour diriger et conditionner les résultats de la recherche scientifique, qui est apparemment plus indépendante que celle sponsorisée exclusivement par des entreprises privées. Un autre résultat est de placer le logo, l'image de la recherche publique sur ce qui est en réalité orchestré par des entreprises privées. La recherche publique est privatisée, de manière discrète, en retardant la production de résultats gênants, et le nombre d'articles scientifiques publiés sur un sujet (par exemple, la mort soudaine et inattendue des abeilles générée par des facteurs inconnus ou causés par des dizaines de facteurs équivalents) plutôt que sur un autre (par exemple, les insecticides) est amplifié. On obtient donc une super-représentation d'aspects moins importants qui influencent les chercheurs eux-mêmes et toute personne qui doit s'occuper du travail de recherche bibliographique. Il devient plus facile de citer les œuvres les plus nombreuses. Dans de nombreux domaines, les investissements privés ont dépassé ceux du secteur public, comme cela a été le cas aux États-Unis pour la recherche agricole. Dans les domaines où l'écart entre les secteurs public et privé est important, il devient difficile de contrer ou d'enquêter sur des aspects très techniques lorsque la différence de connaissances et de compétences devient énorme. Il est difficile de maintenir la poursuite équilibrée et exempte d'irrégularités lorsque les contrôleurs se déplacent à vélo et les contrôlés en avion supersonique. Dans de nombreux domaines scientifiques, une recherche publique forte est une nécessité pour le bien de tous.

Les entreprises privées peuvent financer la recherche publique et faire des dons très importants. De manière parfois invisible, il est possible d'influencer des parties apparemment indépendantes. Et, comme nous l'avons déjà mentionné, il y a un autre avantage : la recherche qui est en partie soutenue par des fonds publics est financée, elle devient donc également un investissement rentable. Les ressources publiques, qui peuvent être plus importantes que les ressources privées, sont orientées vers des résultats utiles aux particuliers par le biais de dons.⁷⁴⁹

- Financement de la presse populaire et des *mass media*. Cela détourne l'attention de questions plus importantes. Dans la presse non scientifique, il est également plus facile de publier des informations incorrectes et partiales et, en même temps, d'en assurer une plus large diffusion. Cette stratégie consiste notamment à remplir Internet et la presse non scientifique (presse "grise") d'arguments et de légendes pseudo-scientifiques. Le martèlement constant de la nature multifactorielle de la mortalité des abeilles et des pollinisateurs, ou la nécessité de découvrir un nouveau facteur, en sont des exemples efficaces.

- Rendre les résultats de la recherche publique accessibles à tous gratuitement. Parmi les nombreuses incohérences du système actuel de recherche publique, il convient de souligner un point particulièrement sensible : les chercheurs peuvent choisir de publier leurs résultats dans des revues scientifiques disponibles gratuitement sur Internet, c'est-à-dire qui peuvent être lues par tout le monde sans frais (*open access*), ou dans des revues pour lesquelles ils doivent payer un abonnement. Les groupes de recherche qui reçoivent un soutien public, même minime, ne devraient pas avoir le droit de publier leurs résultats dans des revues payantes. La publication dans des revues dont l'accès est payant pour les lecteurs constitue un obstacle supplémentaire à la diffusion de l'information. Les recherches financées par des fonds publics doivent être accessibles à tous et publiées dans les langues officielles des pays qui les financent.

Un autre aspect critique concerne l'utilisation des résultats obtenus avec des fonds publics. Dans le monde entier, il existe des lois autorisant les universités à enregistrer les résultats de la

recherche publique dans des brevets partagés avec des entreprises privées.⁸⁴⁵ De cette manière, les avantages sociaux d'une propriété intellectuelle commune sont privatisés, se transformant en une grande source de profit pour quelques entrepreneurs.

- Utiliser des méthodes et des protocoles scientifiques faibles et inadaptés pour prouver ce qui a été publié. Malheureusement, seuls des experts hautement spécialisés dans ce domaine sont capables de démêler ce genre d'informations pseudo-scientifiques. Les expériences menées sur le terrain pour prouver l'innocuité d'un traitement (par exemple, les néonicotinoïdes dans le colza) consistent à placer quelques ruches à proximité d'une parcelle traitée de quelques milliers de mètres carrés.⁴⁷⁵ Les abeilles, en revanche, ont un rayon d'action de plusieurs kilomètres, c'est-à-dire au moins 10.000 fois plus grand. Il est désormais impensable d'espérer trouver en Europe, mais pas seulement, des zones aussi vastes qui ne soient pas contaminées par des herbicides ou des insecticides. Cela signifie que les abeilles situées à une certaine distance du champ traité auront le même taux de mortalité que celles des ruches situées à proximité, puisque la zone dans laquelle elles se déplacent est la même et qu'elles sont toutes également exposées aux mélanges complexes. Cela confirme ce qui était prévu : les abeilles exposées aux pesticides ne subissent pas de dommages ou de problèmes différents de ceux des abeilles considérées comme non exposées.

La probabilité de détecter des agents pathogènes ou des problèmes dans la colonie dépend de plusieurs facteurs. En général, la méthode d'échantillonnage et la taille de l'échantillon influencent le niveau de précision et de fiabilité des résultats qui peuvent être obtenus. Par exemple, si l'objectif est de détecter la présence d'abeilles infectées, lorsque seulement 5% présentent des signes du parasite, avec une probabilité de 95%, au moins 59 abeilles doivent être échantillonnées. Mais s'il faut essayer de détecter des signes de maladie avec une probabilité de 99%, alors que les signes ne sont évidents que chez 1% des insectes, il faudrait échantillonner au moins 459 abeilles.⁴⁸⁰ Par conséquent, la taille de l'échantillon peut rendre la détection d'un problème statistiquement probable ou improbable et fait donc la différence entre un résultat positif ou négatif. La conclusion est que l'application de mesures simples, qui ont une signification statistique, peut ou non faciliter la dissimulation de certains résultats.

- Rédiger des articles scientifiques en n'examinant que les publications dont les conclusions sont favorables à la thèse proposée et détourner l'attention en la diluant sur d'autres causes (par exemple, d'autres pesticides tout aussi dangereux) sont des questions qui ont déjà été abordées.⁴⁷⁵

- Recruter des pseudo-experts pour s'exprimer dans les journaux ou dans les émissions de télévision. Ils pourraient ironiquement être qualifiés de *consultants différemment qualifiés* ou d'ignorants présomptueux comme ceux qui se trouvent dans les rangs des négationnistes du changement climatique ou des catastrophes environnementales.⁶⁸⁰ Malheureusement, la propagande incompétente de l'industrie du doute dispose d'énormes ressources économiques et c'est sans aucun doute un grand gaspillage.

- Attaquer les gens avec la presse ou des menaces légales. Cette stratégie est plus efficace lorsqu'elle s'attaque aux personnes plutôt qu'aux organisations auxquelles elles appartiennent, si elles ont des opinions gênantes et contraires aux intérêts commerciaux.⁵⁵³ Les chercheurs indépendants peuvent rencontrer de nombreux obstacles pour soutenir des résultats contraires aux intérêts des grandes entreprises, ce qui se traduit par des carrières beaucoup plus difficiles (par exemple, une réduction des financements).⁵⁵⁷ Le cas désormais bien connu dans lequel le découvreur des effets du plomb sur le cerveau a été persécuté sur la base d'accusations infondées de malhonnêteté est rapporté.⁵⁷⁰

- Secrets nuisibles. Les analyses nécessaires pour établir les interdictions, les concentrations maximales autorisées et les cultures sur lesquelles les différents pesticides

doivent être utilisés dans le monde sont le résultat de recherches menées directement ou indirectement par les fabricants.⁶⁸² Lorsque l'industrie finance la science et que, en même temps, la science indépendante ne dispose pas de fonds et de ressources suffisants, un déséquilibre très dangereux se crée. Les documents nécessaires pour décider de l'utilité ou non d'un produit, et de sa dangerosité, sont conçus par les parties prenantes, c'est-à-dire les entrepreneurs qui les commercialisent. Les études permettant de documenter les risques pour la santé humaine et les études écotoxicologiques réalisées avant la mise sur le marché d'une substance ne sont souvent pas publiées dans des revues scientifiques.²⁸⁰ Étrangement, cette information est classée comme un secret commercial et donc confidentielle. Le caractère secret de ces informations les place de fait en dehors du domaine scientifique, car l'un de leurs principaux aspects fait défaut : la comparaison et la validation. Seuls les résultats que les entreprises décident de rendre publics sont publiés. Cette façon de faire renforce le pouvoir des produits agrochimiques. Le secret n'est utile qu'aux entrepreneurs et nuit à la santé publique, pourtant c'est le cas partout sur la planète. Les noms des experts des tables de décision institutionnelles qui évalueront, au niveau européen et dans chaque pays, sont considérés comme confidentiels et secrets. Il n'est donc pas possible de connaître les noms de ceux qui protégeront la santé publique. En réalité, ces noms ne sont pas secrets pour tout le monde, ils sont par exemple connus des entreprises agrochimiques et des hommes politiques, et peuvent donc faire l'objet de pressions.

Les stratégies présentées ci-dessus ne sont que quelques-unes des cartouches dont disposent les personnes disposant d'énormes ressources financières.

UN ÉCART ALARMANT ENTRE LES RESSOURCES SUR LE TERRAIN

La communauté scientifique indépendante (travaillant dans des centres de recherche publics et n'acceptant pas de financement de la part de sociétés agrochimiques) travaillant sur la toxicologie des abeilles dans le monde est minuscule. Il s'agit probablement de quelques centaines de chercheurs tout au plus. En 12 mois (décembre 2018-décembre 2019), il y a eu 162 articles scientifiques publiés (sur PUBMED) qui ont "*Apis mellifera*" dans le titre et 14 qui ont les mots "*Apis mellifera*" et "*pesticide*". Pour avoir une idée de la différence de ressources impliquées, une entreprise comme *Monsanto*, qui produit des pesticides et des semences génétiquement modifiés, compte au moins 20 700 employés et réalise un chiffre d'affaires de plus de 14 milliards de dollars (2017).³⁷⁷ La société *Du Pont*, qui opère dans le même secteur, comptait probablement au moins 60.000 employés (2005), la société *Syngenta* au moins 27.000 employés (2017) et un chiffre d'affaires de plus de 73 milliards de dollars.^{380, 381} L'entreprise agrochimique *Bayer*, en 2017, comptait plus de 99.000 employés et un chiffre d'affaires d'au moins 35 milliards de dollars.³⁸⁴ Ces chiffres sont un indicateur de la force de l'industrie agrochimique qui produit des pesticides, des semences et des plantes génétiquement modifiées. Chacun d'entre eux est un géant représenté aux quatre coins de la planète. En comparaison, la communauté des chercheurs scientifiques indépendants et les organismes publics chargés des contrôles nationaux sont des organisations très petites et moins agressives. Lorsqu'il s'agit de défendre leurs intérêts, les différentes entreprises agrochimiques forment des organisations aux objectifs communs et sont donc encore plus fortes et plus redoutables.

Un autre aspect en faveur des grandes entreprises est que les experts externes (par exemple, les chercheurs universitaires), dans de nombreux cas, ne sont pas payés pour effectuer l'examen de la documentation sur les risques toxicologiques, de sorte que les personnes parrainées par l'industrie auront beaucoup moins d'obstacles.

Il faut toujours se rappeler qu'il suffit de quelques secondes pour détruire un sol qui met des centaines d'années à se régénérer, et qu'une espèce disparue signifie l'annulation définitive d'un équilibre délicat qui est le résultat de millions d'années de travail : celui de la sélection naturelle.

LE RÔLE DES AUTORITÉS PUBLIQUES DANS LA PROTECTION DES INTÉRÊTS COLLECTIFS EST CONSTAMMENT COMPROMIS

L'affaiblissement du rôle de l'État dans la protection des intérêts collectifs est un aspect très alarmant. Les organismes publics chargés de protéger l'environnement, la santé et la démocratie sont corrodés par des règles économiques et financières conçues pour bénéficier à court terme à quelques entrepreneurs. Les stratégies appliquées pour affaiblir le système public sont multiples et pourraient faire l'objet de centaines de pages d'analyse approfondie.^{260, 280, 307, 741} Dans certains pays du monde, les agences chargées d'autoriser les pesticides sont financées de manière transparente et légale par les entreprises chimiques qui produisent les molécules à commercialiser. Le groupe d'experts qui doit évaluer l'opportunité d'autoriser la commercialisation d'un pesticide sur un continent ou un pays est composé de quelques personnes, dont la plupart représentent les intérêts des entreprises productrices. Les experts externes (par exemple, les chercheurs universitaires) peuvent avoir reçu des fonds ou avoir été consultants auprès des entreprises produisant les pesticides. Voici quelques aspects qui devraient nous faire réfléchir.

- Les intérêts privés peuvent occuper des positions de pouvoir dans les organismes publics chargés d'autoriser, d'influencer ou de soutenir l'utilisation des pesticides (par exemple, les politiciens). Aux États-Unis, où les ressources économiques utilisées par les particuliers pour financer les hommes politiques doivent en partie être déclarées, il s'avère que des investissements de plusieurs dizaines de millions d'euros par an sont réalisés par chaque entreprise agrochimique. En anglais, ce type de conditionnement est appelé "*lobbying*" et vise à influencer les choix politiques. En même temps, de nombreux scandales concernent des cadres et des experts qui ont tour à tour occupé des rôles cruciaux en matière de contrôle dans des organismes publics et des entreprises privées. De cette façon, le contrôlé devient son propre contrôleur. Les experts externes ont pu être alternativement des employés des entreprises chimiques (pour lesquelles ils ont compilé la documentation nécessaire à la demande de commercialisation) et des employés des organismes chargés de délivrer les autorisations pour les molécules elles-mêmes. Il est inacceptable de pouvoir s'asseoir alternativement des deux côtés de la table de décision. Occuper les tables de travail organisées pour évaluer la sécurité et le danger des pesticides et être numériquement et économiquement avantagé est un point critique scandaleux. Dans ce cas, les institutions se livrent à un laxisme éthique qui permet aux entreprises privées de se contrôler. Les entreprises privées préparent la documentation sur l'évaluation toxicologique et leurs experts les évaluent sous le couvert des institutions. La méthodologie de prise de décision est donc minée dès le départ et ne peut que favoriser les décisions égoïstes. Les entreprises agrochimiques conçoivent leurs propres règles pour assurer la protection de l'environnement et de la santé. Le rêve de tout entrepreneur industriel est ainsi pleinement réalisé.
- Influencer l'élaboration de la réglementation sur l'utilisation des pesticides ainsi que la conception et la mise en œuvre de mesures dissuasives telles que les sanctions. Il est possible d'influencer les choix politiques qui doivent protéger l'intérêt collectif, comme

celui de la protection de l'environnement. Si le choix ne reposait que sur des critères sanitaires et écologiques, il n'y aurait pas de choix et les comportements égoïstes seraient écrasés, mais l'accent est mis sur les critères politiques et économiques. En fait, les coûts ne sont que partiellement évalués, car on calcule le manque à gagner à court terme pour les particuliers, et on oublie systématiquement les coûts sociaux, environnementaux et sanitaires, qui se manifestent généralement sur une période beaucoup plus longue. Les coûts indirects, tels que les coûts environnementaux et sanitaires, sont bien plus élevés que le manque à gagner pour les particuliers mais sont tacitement répartis sur l'ensemble de la communauté et les générations futures. Un exemple concret : pour lutter contre un coléoptère (*Diabrotica virgifera*) dont les larves attaquent les racines du maïs, le néonicotinoïde clothianidine était obligatoire en Allemagne.⁴⁸⁴ La clothianidine a ensuite été retirée d'Allemagne, mais l'utilisation obligatoire de néonicotinoïdes dans les semences de maïs contre cet insecte a également été réglementée dans d'autres États (Autriche).

- Centraliser la production de règles et de règlements de manière à ne laisser aucune liberté d'action aux habitants du territoire. Cela présente plusieurs avantages : cela réduit le nombre d'acteurs avec lesquels il faut interagir pour atteindre les objectifs, et cela réduit la possibilité de communication entre les décideurs officiels et le territoire qui en subira les conséquences. L'application de cette méthode et sa mise en œuvre sont tout simplement antidémocratiques et réduisent les possibilités d'autodéfense.
- Financement de consultants externes, experts en la matière. De cette manière, les entreprises entrent en contact direct avec des personnes importantes qui pourraient leur être utiles le moment venu. Cette démarche est si discrète que les conseillers eux-mêmes peuvent ne pas se rendre compte qu'en acceptant un financement, ils perdent leur liberté. Dans de nombreux pays du monde, comme les États-Unis, le financement d'organismes qui sont également chargés de l'évaluation toxicologique est autorisé et légal. Ainsi, au lieu de donner secrètement ou indirectement de généreuses ressources, on peut le faire publiquement. Le financement privé des organismes de contrôle n'est plus un scandale intolérable, mais est bienvenu et rendu public avec reconnaissance.³⁰⁷
- Dérogations. L'un des mécanismes exploités par le pouvoir agrochimique lorsque les choses tournent mal est le mécanisme de dérogation. La législation européenne sur les pesticides prévoit la possibilité de déroger (par exemple pour 120 jours) à l'interdiction d'utiliser un pesticide. En réalité, chaque État peut autoriser temporairement l'utilisation de molécules interdites. En Europe, 59 dérogations ont été accordées en 2007, puis 321 en 2010, dont 170 pour la France (par exemple, pour l'utilisation de la roténone sur les pommes, les pêches, les vignes et les pommes de terre).²⁸⁰ Dans certains cas, les dérogations sont fondées sur un concept à la fois étonnant et incroyable : l'utilisation durable des pesticides. Ce concept est repris par la réglementation européenne (directive européenne 2009/128/CE) et nationale (en Italie le décret du 22 janvier 2014) pour permettre des dérogations pour l'utilisation durable de produits connus pour être des poisons : un oxymore évident. Le non-respect des accords internationaux visant à limiter l'utilisation de pesticides très dangereux est, après tout, un autre moyen bureaucratique de retarder l'action. Par exemple, la convention de Stockholm, qui vise à limiter l'utilisation de substances toxiques, dont au moins 15 pesticides, n'a pas été ratifiée par plusieurs pays, notamment l'Italie, l'Inde et les États-Unis. En Europe, quatre pesticides considérés comme très dangereux pour les insectes (trois néonicotinoïdes et le fipronil) ont été interdits par la réglementation européenne en 2013.

Entre 2013 et 2016, plusieurs pays européens ont délivré au moins 1.100 autorisations d'utilisation de substances interdites, dont au moins 62 concernaient quatre pesticides très toxiques pour les abeilles. ¹¹⁷⁰ Il s'agit d'un abus manifeste de l'application de procédures qui ne devraient être activées qu'en cas d'urgence avérée et sans alternative possible. Les États membres parviennent à ignorer efficacement les interdictions et la Commission européenne n'est pas en mesure de mettre un terme à ces actions nationales peu respectueuses de l'environnement. Dans la plupart des procédures d'urgence (dérogations), ni la dangerosité des circonstances ni le caractère exceptionnel ne sont évidents et, en même temps, aucune mesure alternative à l'utilisation des substances les plus toxiques dont nous disposons pour exterminer les insectes (et pas seulement) n'est évaluée. Les demandes de dérogations sont très souvent formulées par des industries telles que celles qui produisent des pesticides ou des semences. Seulement 6% des demandes de dérogations proviennent d'organismes publics. ¹¹⁷⁰

- La responsabilité de la preuve de la dangerosité. Dans le domaine de la santé environnementale, on enregistre des méthodes de gestion de la sécurité très discutables. L'industrie a réussi à déplacer les coûts de la preuve de la dangerosité des substances vers les autorités publiques ou la communauté. ⁴⁶⁵ Ce devrait être l'inverse, c'est-à-dire que l'industrie devrait prouver que la substance est inoffensive. Par conséquent, tant que le danger n'est pas prouvé de manière claire et évidente, on gagne du temps et de l'argent. La législation est souvent conçue pour éviter les restrictions et réduire la responsabilité légale pour les décès et les problèmes de santé causés. ³⁰³ En général, une approche politique populaire consiste à considérer qu'un produit est sûr s'il ne tue pas plus d'une personne sur un million chaque année. Mais malheureusement, cette information, c'est-à-dire le nombre de décès causés, devra attendre des décennies d'utilisation du produit et le coûteux suivi épidémiologique concomitant effectué par des organismes publics indépendants des intérêts économiques privés. On peut prendre l'exemple du lindane (un insecticide organochloré), un dangereux neurotoxique, un polluant persistant et un cancérigène probable, commercialisé pour la première fois en 1938 et interdit en Europe en 2006. Les mesures nécessaires pour contenir les effets dévastateurs de cette molécule n'ont été prises que près de 70 ans plus tard. Une substance est considérée comme inacceptable si elle provoque un nouveau cancer par million de personnes exposées. Il faut savoir que le CIRC (Centre international de recherche sur le cancer) n'a évalué le risque cancérigène que pour environ 1.000 substances, dont certains pesticides. Si l'on considère que les pesticides seuls, leurs métabolites et les substances ajoutées aux produits commerciaux (par exemple, dispersants, solvants, adjuvants) se comptent par milliers, on constate que le système actuel est incapable de protéger la santé. La dose journalière admissible et d'autres indicateurs tels que les concentrations maximales autorisées ne sont pas très rassurants. Nous devrions avoir l'intelligence d'interdire des milliers de produits dangereux, au lieu de continuer aveuglément à considérer comme inoffensives des substances qui se révéleront certainement extrêmement nocives demain. Le résultat de cette approche est que l'humanité et toute la biosphère servent de cobayes, que les pesticides sont d'abord distribués massivement pendant des dizaines d'années et qu'ensuite, si les morts et les empoisonnés sont en quelque sorte enregistrés, des décisions plus intelligentes seront peut-être prises. La dégradation irréversible de la biosphère enregistrée à cette époque devrait nous amener à appliquer le principe de précaution, même lorsque la gestion des risques repose sur des incertitudes scientifiques. ⁴⁶⁶

- Des budgets peu transparents. Nous devons tous être exposés à des substances toxiques et c'est pourquoi nous devrions avoir le droit de savoir, d'être informés sur la toxicité des pesticides et leur utilisation. Non seulement les grandes entreprises de pesticides devraient être plus transparentes, mais aussi les agriculteurs, les entreprises alimentaires, les chaînes de supermarchés. Leurs budgets devraient révéler les sommes qu'ils investissent dans l'agriculture chimique, et les différents aliments pourraient faire l'objet d'une publicité indiquant les molécules chimiques utilisées.
- Processus industriels peu transparents. Il est très utile pour dissimuler l'extrême toxicité de certains procédés industriels qui, dans certains cas, ont entraîné de nombreux et graves problèmes de santé pour les travailleurs ou des accidents graves.
- Surmonter les interdictions. L'une des stratégies utilisées avec succès depuis plus de 50 ans consiste à commercialiser de nouvelles molécules (par exemple des insecticides) dont la structure chimique, le mécanisme d'action et la toxicité sont similaires à ceux de la molécule qui vient d'être interdite (par exemple les organochlorés et les néonicotinoïdes). Il faut s'opposer à cette façon de résoudre les problèmes en remplaçant une substance par une nouvelle, totalement équivalente en termes de dangerosité. Une autre possibilité utilisée est d'interdire la molécule dans une culture et de l'autoriser dans d'autres. L'imidaclopride a été introduit en France en 1991 sur les navets, en 1993 il a également été autorisé sur le maïs et le tournesol, et en 1999 il a été interdit sur le tournesol mais pas sur le maïs.³⁰⁷ Plus tard, en 2004, il a également été interdit dans les tournesols. En revanche, entre 2004 et 2007, trois autres néonicotinoïdes (par exemple le thiaméthoxame et la clothianidine) ont été autorisés, c'est-à-dire des molécules équivalentes en termes de structure chimique, de mécanisme d'action et de toxicité. Le bénéfice attendu de ces interdictions a été immédiatement annulé par l'introduction de nouvelles molécules tout aussi toxiques. Cette stratégie permet aux entreprises agrochimiques de gagner du temps. Les interdictions peuvent également être contournées par d'autres stratégies, par exemple en permettant que les mêmes pesticides soient distribués d'une manière différente : en traitant les feuilles au lieu des graines.⁵⁸³

Les limites des concentrations maximales autorisées, par exemple dans l'eau potable, sont le résultat de choix politiques plutôt que toxicologiques. Un exemple est l'indication d'une concentration seuil unique pour toute molécule, indépendamment de l'évaluation du danger : la limite des concentrations maximales autorisées de pesticides dans l'eau potable est de 0,1 microgramme/litre, malgré le fait que de nombreuses molécules sont biologiquement actives à des concentrations 10 ou 100 fois inférieures. Même les concentrations maximales autorisées dans les denrées alimentaires sont le résultat de décisions politiques et d'évaluations économiques, plutôt que d'analyses des risques pour l'environnement et la santé humaine. C'est pourquoi chaque pays réglemente différemment l'utilisation des pesticides et, dans certains cas, il existe même des différences régionales, c'est-à-dire à l'intérieur d'un même pays.

Les énormes ressources économiques dont dispose l'agrochimie lui permettent d'utiliser de nombreuses armes pour dissimuler les preuves et retarder toute action contraire aux intérêts économiques. Des stratégies médiatiques perfides sont prévues pour influencer facilement les politiciens et convaincre les non-experts en la matière, qui sont plus nombreux et souvent plus influents que les chercheurs indépendants.

Il est facile pour quiconque de constater que les industriels mettent en jeu une quantité effroyable de ressources pour atteindre des objectifs économiques, sans se préoccuper des répercussions générées par cet acharnement. Les profits à court terme sont au-dessus de toute

autre considération. De plus en plus, la science est subordonnée aux intérêts économiques de l'agrochimie et de la politique, qui sont également subordonnés aux objectifs commerciaux.

Les documents, les résultats des évaluations toxicologiques, les noms des experts, les situations de conflit d'intérêts : tout fait le jeu des intérêts privés. Les citoyens et leurs représentants (comités, associations de protection de la nature, etc.) ainsi que les chercheurs universitaires devraient pouvoir consulter toute la documentation toxicologique produite par les industries agrochimiques pour certifier l'innocuité de leurs produits avant leur commercialisation.

C'est également en raison de tous ces facteurs que des décisions complètement différentes sont prises dans les différents pays du monde : les pays réglementent de manière différente l'utilisation des pesticides sur les mêmes cultures. En conséquence, il existe des milliers de règles différentes indiquant des dizaines de milliers de concentrations maximales admissibles de pesticides dans les aliments, et celles-ci sont en constante évolution : au moins 170.000 règlements en Europe.²⁸⁰ En Europe, une tentative a été faite depuis 2008 pour unifier les différentes concentrations maximales autorisées réglementées dans les différents pays. Plus les limites sont permissives, plus il est facile de les respecter. Cependant, le commerce international des denrées alimentaires rend le contrôle du respect de ces limites presque impossible.

DES ACCORDS COMMERCIAUX NON DÉMOCRATIQUES

Les traités économiques confirment le pouvoir des grandes entreprises multinationales, et pas seulement des entreprises agrochimiques, sur les gouvernements nationaux. Certains traités commerciaux internationaux proposent la création de tribunaux spéciaux, sans appel, devant lesquels les entrepreneurs peuvent poursuivre les gouvernements nationaux s'ils estiment que les réglementations étatiques portent atteinte aux intérêts privés (par exemple, le *Partenariat transatlantique de commerce et d'investissement*, TTIP).⁴⁵³ Les litiges ne seraient pas jugés par des tribunaux ordinaires qui raisonneraient sur la base de toute la législation existante, comme cela est déjà possible aujourd'hui, mais par des juristes spécialisés dans l'application des règles commerciales, qui ne jugeraient que sur la base du traité lui-même. Selon cette approche visant exclusivement à protéger les intérêts privés, si un État, peut-être en introduisant une règle pour protéger le climat ou la santé, cause un préjudice économique à une entreprise, il peut être contraint de faire marche arrière et d'indemniser l'entrepreneur. S'il est reconnu coupable, cet État, cette municipalité ou cette région pourrait être contraint de retirer la mesure ou d'indemniser l'entreprise.

Certaines organisations (comme l'OMC) déclarent ouvertement que les activités commerciales ont la priorité sur la justice sociale ou la protection de l'environnement.⁹⁸⁰ Les impositions résultant des règles du marché, qui sont enregistrées depuis des années, comprennent par exemple le fait de forcer un État à consommer des aliments contenant des résidus de pesticides plus élevés que ne l'exige la réglementation nationale en matière de protection de la santé. Ne pas accepter la liberté recherchée par les règles du marché conduit en représailles à l'application de droits élevés sur les produits que l'on souhaite exporter. Ces mesures de rétorsion ont été officiellement réglementées pour contrer l'interdiction d'importer dans l'UE des produits carnés à forte concentration d'hormones en provenance des États-Unis. En Europe, cela s'est traduit par une augmentation des droits d'exportation de divers produits vers les États-Unis. En réalité, les règles supranationales, c'est-à-dire celles fixées par les multinationales, la finance et quelques acteurs très puissants, prévalent sur les règles nationales. Le commerce non réglementé donne de facto aux acteurs commerciaux le pouvoir de négliger ou d'ignorer la justice, l'environnement, l'éthique et les droits de l'homme. Les intérêts sanitaires locaux et collectifs sont écrasés par la loi économique artificielle du plus fort. L'environnement devient subordonné aux intérêts économiques de quelques-uns. Pour espérer en tirer des bénéfices, il faut changer les règles,

notamment celles des plus riches qui ne se soucient pas de l'utilisation débridée des ressources naturelles. D'autres objectifs alarmants que les entreprises se fixent avec l'application de ces accords commerciaux sont la suppression des barrières non tarifaires, c'est-à-dire les différences entre les réglementations techniques, entre les normes appliquées aux produits, entre les règles sanitaires et phytosanitaires. Sous prétexte de réduire les obstacles à la libre circulation des produits, ils tentent d'uniformiser les règles de protection de l'environnement et de la santé à l'échelle de la planète et vers le bas afin de répondre à des objectifs commerciaux.

Un autre point sensible est que ces traités sont négociés en secret.⁴⁵⁴ Certains traités établissent des règles qui favoriseront l'injustice et une réduction de la possibilité de défendre l'environnement et la santé. Les choix anti-démocratiques qui privatisent la justice et endommagent l'environnement sont soutenus. La promotion de ces stratégies génère divers effets secondaires antidémocratiques qui favoriseront les inégalités : par exemple, les secteurs publics sont susceptibles d'être davantage privatisés (par exemple, l'eau potable, les déchets, les transports, l'éducation et la santé).⁴⁵⁵ Les petits producteurs et entrepreneurs seront facilement dépassés. Les États risquent de perdre leur souveraineté en matière de protection de l'environnement et de la santé. Le système conçu par ces règles pousse vers moins de durabilité et moins d'attention aux équilibres socio-environnementaux : des monopoles très dangereux sont favorisés. Il y a plus de 20 ans, les multinationales contrôlaient déjà 40% du commerce alimentaire mondial, 20 entreprises contrôlaient le commerce mondial du café, une entreprise contrôlait la quasi-totalité du marché du thé conditionné.⁷⁴⁹ La formation d'oligopoles et de monopoles se produit dans de nombreux secteurs clés de la production alimentaire, tels que les céréales (par exemple, le blé). La concentration du marché entre les mains de quelques organisations privées est très dangereuse. Les dix premières sociétés semencières contrôlent plus de la moitié des sources de semences dans le monde. Il en va de même pour les médicaments vétérinaires, et le pouvoir commercial des pesticides est encore plus concentré. Ces chiffres, probablement inexacts et sujets à de constantes fluctuations, permettent toutefois d'enregistrer une tendance à la concentration du pouvoir et de la richesse. La stratégie publicitaire de cette tendance commerciale contient un paradoxe majeur : le libre marché, souvent présenté comme un système capable d'assurer une saine concurrence, génère au contraire une augmentation des monopoles ou oligopoles. En conséquence, les consommateurs sont de moins en moins libres et informés, et les producteurs tels que les agriculteurs sont de plus en plus pauvres. Dans de nombreux domaines, la recherche scientifique est également devenue essentiellement privée, avec les conflits d'intérêts évidents et les compromis inacceptables qui en résultent. Le pouvoir d'influencer négativement les règles de la démocratie, de la justice, de l'équité, de la transparence et de la protection de l'environnement est de plus en plus concentré entre les mains de quelques entrepreneurs.

LE RÉDUCTIONNISME GÉNÉRÉ PAR L'HYPERSPÉCIALISATION

Un aspect non négligeable, qui ressort de la lecture de centaines de publications, est que la recherche scientifique, lorsqu'elle est si spécialisée, n'a plus la capacité de voir de manière critique le contexte dans lequel s'inscrivent les résultats obtenus. La réalité dans laquelle les phénomènes se produisent est complètement perdue de vue et l'examen se limite à quelques variables, choisies pour atteindre des objectifs prédéterminés. La spécialisation excessive a réduit la capacité à examiner de manière critique des domaines autres que ceux dans lesquels on travaille. En conséquence, la perception de la gravité des risques est sapée et les théories et les résultats qui ont peu de valeur scientifique ne sont pas remis en question de manière involontaire. L'incapacité d'avoir un regard critique à distance signifie se conformer aux

pratiques actuelles, qui sont celles conçues et souhaitées par les intérêts privés. L'esprit critique fait défaut, tout comme le bon sens.

Mais parfois, l'apathie, la négligence et l'inaction du monde scientifique indépendant et libre, qui existe heureusement, et d'autres groupes comme ceux de l'agriculture durable, les associations environnementales et les autorités publiques comme le service de santé, sont étonnantes. Penser que tout le monde est en quelque sorte impliqué dans les intérêts privés des grandes entreprises est simpliste et incorrect. De nombreux facteurs entrent en jeu, comme l'*hyperspécialisation*. Les professionnels et les spécialistes sont de plus en plus éduqués, formés et habitués à penser en termes strictement mono-disciplinaires. La *surspécialisation* offre des avantages indéniables pour le progrès de la science, mais dans ce cas, elle limite la vision et le bon sens. Parmi les effets délétères, il y a une sorte d'aveuglement, d'indifférence scientifique, qui est épidémique et qui s'annule lorsqu'il s'agit d'aborder des aspects cruciaux pour notre survie même. Le *réductionnisme*, qui se limite à tenter de résoudre les problèmes par des approches mono-disciplinaires, lorsqu'il est appliqué à des questions majeures telles que la santé et la protection de la biosphère, est erroné et même contre-productif, car il peut générer des résultats opposés à ceux obtenus par une approche systématique. L'évaluation des risques tels que ceux encourus par les pollinisateurs souffre de cette manière simpliste de traiter les dangers, qui sont désormais si clairs et évidents qu'ils n'ont pas besoin de scientifiques pour les identifier et les analyser. En outre, les modèles utilisés en laboratoire ne produisent pas les résultats prévisibles dans les écosystèmes. Les pesticides remplacent la mortalité due à la prédation naturelle par une mortalité due à un empoisonnement chimique artificiel, car ils endommagent également les écosystèmes en éliminant les prédateurs. Les phénomènes de résistance sont sous-estimés. À cet égard, il est utile de rappeler que, en moyenne, les pesticides n'ont une efficacité que de quelques années (environ six) car les organismes cibles parviennent à devenir résistants pendant cette courte période : il s'agit d'une sélection pour la survie, dans ce cas à l'action destructrice de l'espèce humaine. Les pesticides deviennent donc inefficaces, comme c'est le cas pour les antibiotiques. On s'engage dans une impasse en essayant de surmonter ce problème en augmentant les doses, le nombre de principes actifs et en recherchant des molécules toujours plus toxiques. L'histoire des pesticides le confirme : la toxicité aiguë des insecticides a été multipliée par des milliers en 60 ans et le nombre d'espèces devenues tolérantes ne cesse d'augmenter.

En laboratoire, il est presque impossible de tester les métabolites qui peuvent être générés dans la nature et au sein des organismes, comme les métabolites non ciblés. Dans de nombreux cas, l'histoire nous a appris que les métabolites sont aussi ou plus toxiques que les molécules de départ (par exemple, l'heptachlore).

Les parcours éducatifs doivent offrir des alternatives et se libérer, au moins en partie, du radicalisme de la pensée réductionniste. Le concept de durabilité doit devenir un pilier de toutes les disciplines, car il implique de se reconnecter avec la réalité et les changements désormais inévitables.

DEUXIÈME PARTIE

RÉFLEXIONS SUR L'INCONSCIENCE ÉCOLOGIQUE ET LES CHOIX CONTRE LA NATURE

AU-DELÀ DES LIMITES ÉCOLOGIQUES

NATURE EN FAILLITE ET ESPACE OPÉRATIONNEL POUR L'HUMANITÉ

L'amélioration de la culture relative aux questions environnementales peut contribuer à donner une valeur à ce qui n'a pas de prix : la santé de l'écosystème de la Terre. L'éducation, l'information et la formation peuvent être plus efficaces que d'autres stratégies telles que les mesures financières (aide conditionnelle), la fiscalité (le pollueur doit payer plus, du moins en théorie), l'application de la législation. L'investissement dans une nouvelle et meilleure culture peut être plus rentable que d'autres investissements, comme le financement de stratégies de certification environnementale (par exemple EMAS et ISO 14001).¹² Ainsi, les investissements dans la "culture" peuvent être moins coûteux, plus efficaces et plus rentables que les autres.

La civilisation humaine risque de connaître une grave crise environnementale, sociale et économique si la tendance n'est pas inversée à temps. Cependant, avant de décider comment y remédier, il est nécessaire de comprendre les mécanismes à l'origine de notre système actuel basé sur le consumérisme et le capitalisme, qui est incapable d'une vision de l'avenir. Les pratiques destructrices, qui sont maintenant évidentes pour tout le monde, ne sont ni écologiquement ni économiquement durables.

Au cours des vingt derniers siècles, la population planétaire a augmenté de façon exponentielle. La densité mondiale d'*Homo sapiens* est passée d'un peu plus d'un habitant par kilomètre carré à plus de 45 habitants par kilomètre carré. Cette croissance fulgurante n'a pas été constante ou uniformément répartie. Notre empreinte écologique a jusqu'à présent dépassé la capacité de la planète à régénérer les ressources qu'elle utilise. La plupart des problèmes auxquels l'humanité est confrontée sont la conséquence du désir de croissance illimitée dans un système qui est limité. Au moins 4 milliards de personnes vivent dans la pauvreté ou sont menacées par des guerres et des catastrophes environnementales. Malheureusement, de nombreux indicateurs suggèrent que le nombre de personnes qui verront leurs conditions de vie actuelles se dégrader est en augmentation.

La déforestation est probablement la manifestation la plus évidente du processus de transformation anthropique de la Terre. Les modifications des structures végétales peuvent être considérées comme la mère de toutes les empreintes écologiques humaines. Une vision ironique mais significative de la richesse forestière présente en Europe dans le passé (il y a 12000 ans) pourrait être d'imaginer qu'un singe aurait pu se déplacer d'Espagne en Grèce sans sortir des arbres. À cette époque, la planète était habitée par environ 2 millions de chasseurs-cueilleurs humains. En quelques milliers d'années, nous sommes passés d'un monde contrôlé par la nature à un monde dominé par l'homme, générant un véritable écocide.

Parmi les causes de la perte de biodiversité figurent la chasse, la pêche, les incendies, l'urbanisation, l'agriculture intensive (herbicides, insecticides, travail du sol, etc.) et la pollution. Au moins 300 millions d'hectares de forêts ont été altérés ou détruits depuis 2000, et la réduction de la biodiversité se poursuit désormais à un rythme au moins 100 fois plus rapide que celui enregistré précédemment (à partir d'études de restes fossiles).⁷³⁶ Au moins un quart des zones naturelles de la planète ont été modifiées ou utilisées à des fins commerciales. L'introduction d'espèces exotiques cause également de nombreux dégâts, comme le savent bien les apiculteurs.

Outre la destruction de la biodiversité, un autre indicateur évident de l'empreinte écologique de l'homme est l'excès de carbone libéré dans l'atmosphère, qui entraîne une modification du bilan thermique de la planète et l'acidification des océans. Ces changements n'ont pas d'analogues dans les âges au cours desquels l'espèce humaine a évolué. Nous sommes donc entrés dans une zone d'insécurité, hors norme. L'expérience écologique en cours est unique et est autogérée par le cobaye qui s'est volontairement lancé dans une course folle vers des conditions inconnues. Il est certain que le changement climatique est le résultat de catastrophes écologiques provoquées par l'homme. Les choix effectués dans les années à venir détermineront donc l'intensité et le caractère dramatique des conséquences environnementales. Malheureusement, même si les émissions de gaz altérant le climat étaient réduites, les concentrations de gaz à effet de serre resteraient supérieures à celles de l'ère préindustrielle pendant des siècles. Dans tous les cas, on estime que le réchauffement climatique est important. Différents scénarios sont envisagés (par exemple, IPPC), mais même les plus optimistes prévoient une augmentation de la température, une augmentation de la fonte des glaciers (bancs d'eau), une augmentation du niveau et de l'acidification des océans.⁷⁷⁵ Malheureusement, cette tendance au réchauffement de la planète ne s'arrêterait pas même si nous étions capables de stopper toutes les émissions de dioxyde de carbone. La puissance des changements en cours se manifeste par l'altération des parties les plus éloignées et les plus vierges de la planète, comme les glaciers du pôle Nord.

En 1700, plus de la moitié de la biosphère était à l'état sauvage, tandis que 45% était à l'état semi-naturel.⁶⁸⁰ Aujourd'hui, près des trois quarts de la surface de la planète sont transformés par les activités humaines et moins d'un quart peut être considéré comme étant à l'état semi-naturel ou sauvage. Malheureusement, les règles artificielles de l'économie et de la finance ne tiennent pas compte du simple fait que les limites des systèmes naturels de notre planète ne peuvent être dépassées. Il est franchement inquiétant de continuer à regarder des débats politiques ou d'écouter des économistes universitaires prônant une croissance économique continue et constante. C'est une manifestation de l'analphabétisme environnemental rampant. Les économistes ne tiennent pas compte des limites biophysiques de la planète et du fait que de nombreuses limites planétaires ont été dépassées : nous sommes entrés dans une zone d'incertitude très préoccupante concernant le changement climatique, la perte de biodiversité, l'altération des cycles de l'azote et du phosphore. La glace fond, les insectes disparaissent, les mers sont pillées et la vitesse du changement négatif s'accélère. Pour certaines limites de la biosphère, nous avons déjà atteint le point de non-retour, c'est-à-dire que nous sommes en dehors d'un espace de fonctionnement sûr pour l'humanité. L'humanité découle de la nature et en dépend, elle ne peut donc pas s'en passer. La richesse des économies dépend du capital naturel mais, naïvement, les règles des marchés les considèrent comme des ressources infinies. Nous devons corriger notre relation avec la biosphère car nous sommes devenus la force géologique la plus importante de la planète. La biosphère ne peut supporter une nouvelle appropriation non durable du capital naturel sans compromettre des équilibres indispensables à la sécurité de l'humanité. L'insouciance avec laquelle nous érodons de manière irréversible le capital naturel est imprudente et va à l'encontre du but recherché. Ce sont surtout les pays industrialisés et les économies les plus riches qui vivent bien au-delà des possibilités offertes par la biosphère. La débâcle peut paralyser, mais il faut imaginer une autre société en essayant de sortir du consumérisme et du marché libre, qui sont pathologiques et génèrent des horreurs. La croissance économique infinie, le marché libre, le consumérisme (fondé sur le jetable et le gaspillage) détruisent les systèmes naturels de maintien de la vie.

Les connaissances dont nous disposons sont rares et limitées, comme celles sur les interactions entre l'atmosphère et la biosphère, sur les effets de la déforestation et de la pollution. Ce manque de connaissances devrait nous inquiéter davantage que ce que nous savons des effets du changement en cours. Les prédictions et analyses présentées dans les pages suivantes ne tiennent pas compte de l'effet de surprise, tel que celui généré par les effets de

seuil. La résilience, c'est-à-dire la capacité d'un système à absorber une perturbation avant de modifier sa structure et ses processus, dans le cas de l'écosystème terrestre, est largement inconnue. Nous pouvons raisonnablement penser que la résistance à l'effondrement de l'écosystème terrestre est sérieusement compromise par la destruction du capital naturel.

Pour la première fois dans la courte histoire de l'humanité, une poignée d'entrepreneurs est en mesure de transformer de manière irréversible la biosphère et de contrôler le destin de la majorité de la population mondiale, par exemple en ce qui concerne ses habitudes alimentaires. Quelques armées de travailleurs, gérées par des entrepreneurs impitoyables, sont capables de conquérir et de soumettre des nations entières, les dépossédant de leur souveraineté et de leur sécurité alimentaires, détruisant les forêts, polluant l'air, le sol et l'eau, et exterminant la biodiversité à des fins commerciales. La protection de la biosphère, comme une véritable guerre qui se joue à l'échelle planétaire, nécessite la création de systèmes de défense organisés, agressifs, vigilants, clairvoyants et altruistes : le moment est venu d'organiser l'autoprotection de l'environnement et de sauvegarder les intérêts des générations futures.

Avec la dégradation des sols, la destruction de la biodiversité et le changement climatique, l'agriculture est appelée à changer. La question angoissante qui se pose est la suivante : combien de temps la société et les écosystèmes seront-ils capables de résister à ces changements sans compromettre gravement la paix et le bien-être ? Pour provoquer le changement d'époque nécessaire, nous avons besoin d'un secteur public fort, d'une communauté mieux informée et plus active pour influencer les choix qui affectent la communauté et l'avenir. Nous avons besoin d'un secteur public qui ne se plie pas aux intérêts de quelques-uns.

L'idée de frontières planétaires à ne pas franchir est très efficace pour comprendre la taille de l'espace opérationnel dans lequel il est possible de se déplacer en toute sécurité. Certains des facteurs qui sapent constamment la capacité des écosystèmes à fournir des services essentiels à notre survie sont les suivants :

- La destruction de la biodiversité (déforestation, incendies, propagation d'espèces exotiques, sélection artificielle, etc.)
- Le changement climatique.
- La dégradation des sols.
- La pollution chimique.
- L'altération du cycle de l'eau et son utilisation non durable.
- L'altération des flux naturels d'azote et de phosphore.
- L'acidification des océans.
- La réduction de l'ozone atmosphérique.

Les autres sources de préoccupation mentionnées sont les suivantes :

- Les armes de destruction massive (armes nucléaires, chimiques et biologiques).
- L'intelligence artificielle accroît la possibilité de contrôler et de gérer les flux de données et d'informations et renforce la capacité de prédire et d'influencer les comportements.
- Les biotechnologies permettent pour la première fois de modifier et d'altérer le génome humain et celui de toutes les espèces. Les nouvelles technologies augmentent la capacité d'intervenir dans la loterie de l'évolution et peuvent réserver de nombreuses surprises. Par exemple, de petits groupes de personnes possèdent suffisamment d'outils pour provoquer l'extinction d'écosystèmes entiers, sans que le reste de la population ne puisse rien y faire.
- Le capitalisme favorise des inégalités disproportionnées et permet à quelques individus d'accumuler des richesses tellement énormes qu'ils peuvent influencer le reste du monde. La capacité de quelques entrepreneurs à intervenir dans la biosphère dépasse celle de nations entières, à un degré alarmant et, là encore, est incontrôlable par le reste de la communauté.

L'augmentation de la vitesse d'exploitation des ressources ne peut s'expliquer simplement par la croissance démographique. En fait, l'utilisation des combustibles fossiles et l'extraction des ressources halieutiques ont augmenté beaucoup plus rapidement que la croissance démographique.

Il n'est pas nécessaire d'être particulièrement intelligent pour imaginer les changements qui pourraient être provoqués par une augmentation continue de la pression exercée par l'humanité sur la biosphère. Il est nécessaire de concevoir un plan d'urgence car nous n'avons pas d'autre planète à consommer. Le défi est énorme, et ce ne sont pas les lois du marché ou le libéralisme économique et financier qui apporteront les solutions nécessaires à la protection de la collectivité.

LE CIEL APPARTIENT À TOUT LE MONDE

L'étonnante image de la Terre prise depuis la Lune dans les années 1960 peut être notre point de départ. La planète bleue flottant dans le vide dans un environnement hostile, froid, aux radiations mortelles, largement vide, donne la dimension de notre petitesse et en même temps de notre chance. Comme dans un vaisseau spatial, un équipage et le fonctionnement des services essentiels sont nécessaires à la survie. La mort d'une partie de l'équipage peut compromettre la mission, tout comme il est impossible de se passer des modules nécessaires à l'approvisionnement en air et en eau. Nous compromettons irréversiblement le voyage par l'extinction d'une grande partie de l'équipage et par des processus non durables tels que la production de déchets.

Cinquante-deux ans après la première photo prise depuis la lune, les choses ont considérablement changé. Même dans l'espace, les déchets augmentent. Chaque année, des événements accidentels dangereux se produisent en orbite. Le grand nombre de satellites amplifie les possibilités de collisions, avec des effets d'entraînement pour le moins inquiétants. En cas de collision, il se forme un nuage de débris qui continuera à voyager sur la même orbite que le satellite d'origine, multipliant ainsi la probabilité d'autres impacts.

La pollution lumineuse est un produit insidieux de notre civilisation qui craint la nuit. Le problème est mondial : un tiers de la population de la planète vit dans des régions si lumineuses qu'elles ne peuvent pas voir la Voie lactée. Nous parlons de plus de 2 milliards de personnes. En fait, l'Italie a la distinction peu enviable d'être l'un des pays industrialisés où la pollution lumineuse est la plus élevée : parmi les pays du G20, elle est devancée par la Corée du Sud.⁹²⁷

Les astronomes ont également tiré la sonnette d'alarme : la pollution lumineuse et les milliers de satellites (pour la plupart inactifs) risquent d'entraver l'observation astronomique. On estime qu'environ 1/3 des images des télescopes à grand champ seront traversées par un satellite qui laissera une tache très difficile à éliminer avec des algorithmes de nettoyage car trop brillante.⁹²⁷ En conclusion, nous avons réussi à contaminer même l'espace extérieur à l'air que nous respirons (la troposphère).

La pollution de la haute atmosphère nous amène à une réflexion générale : est-il raisonnable que l'autorisation de lancer des satellites soit donnée par un organisme représentant une nation (par exemple les États-Unis), alors que leurs orbites survolent tous les autres pays du monde qui n'ont pas du tout participé à la décision ? La question environnementale concerne tout le monde et ne peut être résolue sans l'implication de chacun. En fait, chacun peut contribuer à limiter la pollution lumineuse, par exemple en choisissant avec soin les lampes pour les cours et les jardins. La différence entre une bonne et une mauvaise lampe dépend également de sa capacité à diriger le rayonnement vers le bas et non vers l'horizon ou vers le haut. C'est ce que demandent les ordonnances régionales qui ont été adoptées un peu partout dans notre pays, précisément

pour limiter la pollution lumineuse. En outre, elle représente un énorme gaspillage d'énergie et la pollution chimique, due aux émissions, génère des changements irréversibles et inquiétants.

La voûte céleste est un patrimoine de l'humanité dont nous pouvons tous profiter car le ciel étoilé fait partie intégrante de la vie des humains, des animaux et des plantes. En plus de profiter de la beauté du ciel étoilé, nous devrions tous contribuer à sa préservation pour tenter de le garder intact pour les générations futures.

En partant de loin, il a été possible de soulever certaines réflexions telles que la privatisation de la haute atmosphère, la production de déchets et la non-durabilité de nos actions. Nous devons reconnaître et accepter les limites. Nous ne pouvons pas continuer à faire tout ce que la technologie nous permet de faire. Nous devons planifier un avenir durable.

LE SIÈCLE DERNIER : LIMITES PLANÉTAIRES ET SÉCURITÉ ALIMENTAIRE

L'humanité en est arrivée à consommer chaque année plus de ressources renouvelables que la Terre ne peut en régénérer et plus de ressources non renouvelables qu'il n'y a de nouveaux gisements. Nous produisons beaucoup plus de déchets que la biosphère ne peut en métaboliser, et nous distribuons des quantités croissantes de polluants non biodégradables dans l'environnement, altérant ainsi la biosphère de manière irréversible. Nous devons tous réfléchir à la question suivante : combien de temps encore pouvons-nous tenir bon en nous désintéressant de ce processus autodestructeur ?

L'espèce humaine consomme une grande partie de la productivité photosynthétique naturelle de la Terre, et le pourcentage de la biomasse que nous consommons qui finit dans notre estomac est en augmentation. Ce qui devrait nous alarmer, c'est que la part restante de la productivité de la planète, que nous pouvons égoïstement espérer prendre à la nature, est inférieure à celle que nous sommes déjà appropriée. Par conséquent, les prévisions économiques visant à doubler la consommation, et par conséquent la production alimentaire, dans les 20 ou 30 prochaines années sont irréalistes. Malheureusement, si nous ne parvenons pas à mettre en œuvre une révolution verte, ce qui n'est pas réaliste pour le moment, nous nous rendons compte du caractère impitoyable des lois de la nature lorsqu'il sera trop tard, c'est-à-dire lorsque nous aurons détruit la majeure partie de la biodiversité de la Terre. Nous n'avons qu'une seule planète et nous n'avons droit qu'à une seule expérience de ce type. Nous n'aurons pas la possibilité de faire demi-tour. Nous devrions nous demander pourquoi nous continuons à courir vers la catastrophe.

L'évolution de la capacité à produire des denrées alimentaires au cours des 50 à 60 dernières années constitue une réussite, mais pose également des défis. En 50 ans, le nombre de personnes souffrant de malnutrition a diminué de moitié, tandis que le nombre de personnes en surpoids a doublé : probablement moins de 3% de la population mondiale a un apport calorique inférieur à 2000 kcal par jour, mais plus de 39%, soit au moins 2,1 milliards de personnes, sont en surpoids ou obèses (en Italie, 36% des garçons et 34% des filles âgés de 5 à 17 ans sont en surpoids ou obèses).^{755, 985, 1178} Au moins 820 millions de personnes souffrent de la faim, et un nombre bien plus important présente des taux de mortalité et de morbidité élevés en raison d'une nutrition inadéquate. Par exemple, au moins 2 milliards de personnes souffrent d'un apport insuffisant en micronutriments (vitamines et minéraux) et la fréquence du diabète a doublé en 30 ans.¹¹⁷⁸ Il serait probablement possible aujourd'hui d'assurer une meilleure alimentation à tous les habitants de la planète si les inégalités étaient moindres.¹¹⁷⁸

L'agriculture utilise au moins 70% de l'eau prélevée, occupe au moins 40% des terres, est responsable de l'émission d'au moins 30% des gaz qui modifient le climat et est l'une des principales causes de la réduction de la biodiversité : l'agriculture est la principale cause de

l'extinction des oiseaux et des mammifères. Soixante pour cent de l'énergie consommée par l'humanité provient de trois cultures seulement : le riz, le maïs et le blé ; cependant, en 2010, au moins 34% des céréales étaient utilisées pour nourrir les animaux et, d'ici 2050, cette fraction pourrait augmenter.¹¹⁷⁸ D'autres systèmes d'approvisionnement alimentaire ne sont pas non plus durables et ne peuvent que décliner, comme la pêche. Comment assurer une alimentation adéquate aux plus de 10 milliards d'habitants que comptera probablement la planète avant 2050 et préserver les ressources naturelles indispensables à notre survie ? Comment augmenter la production alimentaire sans accroître la consommation irréversible de ressources non renouvelables telles que le sol ? La disponibilité de sols fertiles diminue et les conditions climatiques ainsi que la dégradation par l'industrie alimentaire elle-même ne permettront pas de disposer de plus de ressources que celles qui sont disponibles aujourd'hui. La production alimentaire est une cause majeure de changements négatifs tels que le changement climatique. Il n'existe pas de recettes de solutions facilement applicables, mais certaines indications peuvent être utiles, comme par exemple :¹¹⁷⁸

- Réduire la consommation de produits animaux (par exemple, la viande rouge).
- Préférer les graisses insaturées d'origine végétale aux graisses saturées.
- Augmenter la consommation de protéines végétales telles que les légumineuses pour remplacer les protéines animales. Une consommation accrue d'aliments d'origine végétale pourrait contribuer de manière significative à la réduction des émissions de gaz qui altèrent le climat.
- Augmenter la consommation de légumes tels que les fruits (par exemple : consommer entre 100 et 300 g de fruits par jour).
- Réduire la consommation de sucres simples et d'aliments hautement transformés (les sucres simples doivent représenter moins de 5% des calories totales).
- Utiliser des engrais organiques plutôt que des engrais inorganiques.
- Recycler le phosphore et les nutriments en général.
- Réduire la destruction de la biodiversité en stoppant l'abattage des forêts primaires : entre 2000 et 2014, le Brésil a perdu en moyenne 2,7 millions d'hectares de forêt par an, l'Indonésie 1,3 million d'hectares par an et la République démocratique du Congo 0,6 million d'hectares par an.
- Réduire les captures de pêche. Pour plus de 3 milliards de personnes, les produits de la pêche représentent au moins 20% de leur apport protéique total quotidien.
- Réduire la production de déchets et le gaspillage.
- Augmenter la production alimentaire de manière durable et sans utiliser de pesticides. La transformation du système agricole traditionnel pour le rendre durable (agriculture biologique régénérative) pourrait permettre de séquestrer dans le sol la plupart des émissions de gaz qui altèrent le climat.¹¹⁸¹
- Réduire la consommation de combustibles fossiles pour la production alimentaire et au-delà.
- Réduire la croissance démographique (ce n'est pas un problème dans de nombreux pays comme l'Italie où le taux de natalité suggère que la population pourrait être réduite de moitié en une génération ; un taux de natalité réduit, en l'absence de compensations comme l'immigration, peut constituer un autre problème en raison de l'augmentation excessive de la fraction des personnes âgées dans la population active).

Assurer la sécurité alimentaire d'un nombre croissant de personnes devient un défi très difficile à relever. Les demandes de récolte augmentent, mais la capacité des services naturels à répondre à nos attentes diminue. Garantir un espace de fonctionnement sûr pour l'humanité tout en continuant à augmenter les prélèvements de ressources naturelles, la dégradation des services écosystémiques et les changements irréversibles dans la biosphère est une attente irréaliste. Nous devons nous rappeler que nous vivons sur une planète qui n'est pas infinie.

Depuis 1961, la production céréalière a augmenté de plus de 400%, la production porcine de 450%, la production bovine de 230% et la production de poulet de treize fois. Depuis 1960, la consommation de calories par habitant a augmenté d'un tiers, la consommation de viande a au moins doublé et l'utilisation d'engrais a été multipliée par plus de neuf. Cette croissance ne peut se poursuivre indéfiniment, et les choix que nous ferons détermineront notre santé, celle de la planète et surtout celle des générations futures.

Nous avons domestiqué la nature. Pour illustrer la domination de l'homme sur la nature, seuls 30% de la biomasse aviaire de la planète sont constitués d'espèces sauvages, les 70% restants étant constitués de volailles d'élevage. Chez les mammifères, les proportions sont encore plus impressionnantes : 60% sont des animaux de ferme (bovins et porcins), 36% sont des humains et seulement 4% sont des mammifères sauvages.⁷⁹⁹ La planète ne peut pas supporter des milliards d'humains carnivores. Dans la nature, pour chaque mammifère carnivore (par exemple, les canidés ou les félidés), il existe au moins 100 proies. Plus de 50% des terres agricoles de la planète sont utilisées pour produire des aliments d'origine animale. Si tous les habitants de la planète adoptaient un régime végétarien, nous doublerions l'espace disponible, ce qui permettrait d'en renaturaliser au moins une partie.

L'offre de nourriture a augmenté plus rapidement que la croissance démographique, ce qui a eu des répercussions graves et irréversibles sur les équilibres naturels. Sur le plan positif, la production alimentaire actuelle pourrait couvrir les besoins énergétiques de l'ensemble de la population humaine, mais l'apport de certains nutriments essentiels à la santé est insuffisant. Par exemple, la disponibilité de fruits et légumes par habitant est insuffisante pour garantir une bonne santé à tous.⁷⁵⁵ En même temps, la consommation d'aliments moins sains, tels que les produits dérivés de la transformation et du stockage de la viande et les boissons sucrées, a augmenté de 35% et 50% respectivement entre 1990 et 2015. Les systèmes de production et les habitudes alimentaires ont créé de nouveaux risques tels que la consommation excessive de sucres simples, l'utilisation d'antibiotiques (par exemple dans l'élevage) et l'utilisation de pesticides. Malheureusement, la biosphère est gravement menacée et certaines limites de la capacité d'autorégénération des flux d'énergie et de matière de la planète ont été dépassées, de sorte que nous évoluons dans une zone d'insécurité non durable.

Au moins quatre "limites planétaires" ont été dépassées : les émissions de gaz modifiant le climat, la perte de biodiversité, les modifications des cycles de l'azote et du phosphore et la dégradation des sols. Pour ces quatre aspects, l'humanité est certainement entrée dans une zone d'insécurité, franchissant les limites au-delà desquelles des effets dévastateurs sont déclenchés. Cela signifie que les changements déjà apportés à la biosphère généreront des effets irréversibles et négatifs sur l'humanité, même si la dégradation perpétuée jusqu'à présent devait être complètement arrêtée. En réalité, le système d'équilibres physiques, chimiques et biologiques dont nous dépendons a été altéré, avec des perturbations conséquentes sur la capacité à maintenir en santé et en paix un nombre croissant d'êtres humains, dont la pression écologique augmente encore plus rapidement.

Il est important d'attirer l'attention sur certains des défis auxquels l'humanité est confrontée et qu'elle devra relever différemment de ce que nous avons fait au cours des trois dernières générations.³⁶ Accepter les limites et prendre des mesures pour prévenir les changements irréversibles revient à adopter les recommandations pour la décroissance et une meilleure démocratie. Pour de nombreuses limites planétaires, nous ne savons pas exactement quels sont les plafonds à ne pas dépasser, c'est-à-dire le niveau de dégradation à ne pas dépasser pour éviter le point de non-retour. Nous ne savons pas jusqu'où nous pouvons continuer à ignorer la destruction irréversible de la diversité écologique avant que certains systèmes naturels nécessaires à la survie de l'humanité ne s'effondrent de manière catastrophique. La littérature scientifique présente également des faiblesses. Par exemple, parmi les limites planétaires, celle de la pollution est sous-estimée car, en plus de détruire les formes de vie par intoxication aiguë,

elle ébranle certains mécanismes fondamentaux de la vie, par exemple en altérant l'expression et la transmission génétiques (substances mutagènes ou molécules altérant la fertilité) ou en perturbant la régulation hormonale (perturbateurs endocriniens) chez tous les êtres vivants. Nous rejetons dans l'environnement des milliers de tonnes de substances persistantes et bioaccumulables qui ont des effets biologiques importants et fondamentaux à des doses de millièmes de gramme (par exemple, elles bloquent la photosynthèse). Les conséquences pour la santé humaine sont des épidémies de substances chimiques qui ne sont pas mises en avant comme il se doit. Une importance encore moindre est accordée aux effets de la contamination massive de l'eau, du sol, de l'air et des chaînes alimentaires. La pollution, dans les limites planétaires, ne reçoit probablement pas l'attention qu'elle mérite et ne suscite pas la préoccupation nécessaire pour activer des mouvements d'information et de diffusion. La contamination chimique de l'environnement reste souvent dans l'ombre des débats entre scientifiques et politiciens et sa diffusion de masse fait cruellement défaut.

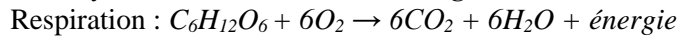
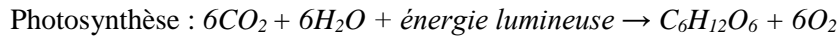
Il ne peut y avoir ni santé, ni prospérité, ni démocratie dans une société qui est incapable de se fixer des limites. Le capitalisme est fondé sur l'illusion de l'inexistence de limites physiques et biologiques. Nous avons remplacé les règles écologiques par le principe d'interdiction qui sous-tend les règles humaines artificielles telles que les règles économiques, financières, politiques et de marché. Cette liberté implique l'acceptation de l'inhumanité, car elle permet la marchandisation de tout, comme l'avenir et les êtres humains. Les administrateurs trahissent déraisonnablement leur mandat en devenant totalement subordonnés au marché et à la finance, mais omnipotents vis-à-vis des administrés. Nous avons été très habiles pour créer les conditions qui compromettent la survie de la moralité et de l'éthique. La culture est également en voie de standardisation, effaçant à nouveau les limites de l'action : on estime que 6.000 langues existent encore (sur les 20.000 parlées dans l'histoire récente de l'humanité) et qu'au moins 50% d'entre elles auront disparu dans moins de 100 ans ; curieusement, un perroquet amazonien a été le dernier à prononcer une quarantaine de mots dans une langue sud-américaine dont les locuteurs humains avaient tous disparu.⁸³⁶ Le développement parasitaire de la société humaine est rendu possible par l'illusion que les limites n'existent pas et, par conséquent, la biosphère et l'identité sociale sont détruites. Dépasser les limites ne détruit pas la Planète mais les écosystèmes dont nous dépendons, nous nous condamnons donc à l'effondrement.

L'APPROPRIATION NON DURABLE DE LA PRODUCTION PRIMAIRE

Pour comprendre le fonctionnement d'un écosystème, nous devons introduire le concept de production primaire, qui est la quantité d'énergie incorporée par un écosystème en termes de carbone par le biais de la photosynthèse. L'énergie de l'écosystème de la Terre dépend des caractéristiques physiques de la planète elle-même et de l'énergie que le Soleil envoie depuis une distance d'environ 150 millions de kilomètres : chaque heure, le Soleil envoie à la Terre plus d'énergie qu'il n'en consomme en un an. Moins de 1% de l'énergie solaire rayonnée sur la Terre est captée par les plantes et convertie en production primaire, c'est-à-dire en construction de biomasse. La photosynthèse convertit l'énergie lumineuse en énergie chimique stockée dans des molécules organiques : les hydrates de carbone ou sucres, comme l'amidon et la cellulose. Une molécule de sucre et six molécules d'oxygène sont produites à partir de six molécules de dioxyde de carbone (CO₂) et de six molécules d'eau. Le carbone contenu dans le dioxyde de carbone (CO₂) atmosphérique est incorporé dans les tissus végétaux. La photosynthèse peut être appelée "*organicisation du carbone*", car elle transforme un composé inorganique en une molécule organique. La production primaire est mesurée en grammes de carbone (g C) par unité de surface (m²) par unité de temps (année).

Les producteurs primaires, c'est-à-dire les plantes, utilisent une partie des glucides produits pour leur propre métabolisme, selon un processus similaire à celui de la respiration animale.

Pour faire simple, dans des conditions naturelles, le dioxyde de carbone est échangé en permanence entre l'atmosphère et les êtres vivants de la biosphère, par deux processus opposés : la photosynthèse et la respiration. Les deux réactions :



La photosynthèse élimine le dioxyde de carbone de l'atmosphère, tandis que la respiration le libère comme sous-produit de l'oxydation de la matière organique (par exemple, les glucides) afin de produire de l'énergie. Le soleil et les plantes ont, au cours de millions d'années, contribué à la création de combustibles fossiles non renouvelables ; théoriquement, ils sont renouvelables, mais sur une période de temps sans intérêt pour l'espèce humaine.

La quantité d'énergie que le Soleil rayonne chaque seconde sur un centimètre carré de la surface de la Terre est appelée la *constante solaire* et est d'environ 1,97 cal/cm² par minute (calories par centimètre carré par minute). Il s'agit d'une valeur indicative car elle suppose que l'atmosphère est transparente et qu'elle augmente sur le plan orienté au sud. En réalité, l'énergie disponible peut être inférieure et varie en fonction des saisons et des conditions (par exemple, la présence ou l'absence de nuages). En Italie, l'irradiation moyenne est de 3-4 kWh/m/jour² pendant les mois d'hiver et de 6-7 kWh/m/jour² pendant les mois d'été.⁹³⁵ Le soleil fournit probablement une énorme quantité d'énergie gratuite, au moins l'équivalent d'environ 133.000 Gtep/an (milliards de tonnes d'équivalent pétrole).

Dans les zones tempérées de la planète, on peut supposer qu'entre 15 et 40 millions de kcal par jour et par hectare (1 ha correspond à 10.000 mètres carrés) arrivent sous forme d'énergie solaire. En un an, cette énergie équivaut à 1,7 million de litres d'essence par hectare. Dans les zones tempérées, l'énergie nette convertie en biomasse correspond en moyenne à 10 millions de kcal par hectare et par an. Cette énergie en matière sèche correspond à environ 2.400 kg/ha par an, avec un minimum de zéro dans les zones désertiques et glaciaires et un maximum de 10.000 kg/ha par an dans les écosystèmes les plus productifs.

Dans les écosystèmes agricoles, on peut considérer qu'une quantité nette d'énergie solaire d'environ 15 millions de kcal par ha arrive. Bien que cette quantité d'énergie corresponde à environ 0,1% de celle qui atteint la surface, elle permet théoriquement d'obtenir 3.500 kg de matière sèche de biomasse (c'est-à-dire le poids de la biomasse sans l'eau) par an et par hectare (on peut espérer obtenir environ 4.200 kcal par kilogramme de biomasse). Une partie de l'énergie captée par les plantes sera utilisée pour le métabolisme, la respiration, la défense contre les parasites et à d'autres fins ; par conséquent, seule une fraction peut être utilisée pour constituer la biomasse. Certaines cultures telles que le maïs et la canne à sucre peuvent capter de plus grandes quantités d'énergie solaire puisqu'elles peuvent atteindre 5%, mais il faut également investir de l'énergie dans l'irrigation, la production et la distribution d'engrais et de pesticides.

Environ 25-30 t de matière sèche de maïs par an et par hectare, produites par une agriculture énergivore (c'est-à-dire que l'énergie fossile utilisée est supérieure à celle obtenue sous forme d'aliments), peuvent nourrir 2 à 4 bovins laitiers par an (entre 200 kg et 500 kg chacun), 12-15 porcs (80-100 kg chacun) ou au moins 12-15 humains, en considérant de manière simpliste l'apport calorique de 12 t de matière sèche de céréales.⁷⁴¹ Si le maïs est utilisé pour la consommation humaine, il peut fournir environ 980 kcal/kg (à 70,3% d'humidité), ce qui correspond à environ 3,3 kcal par gramme de matière sèche du grain, avec la composition chimique suivante : 19,5% d'amidon, 3,4% de protéines, 1,3% de lipides. La balle de maïs entière, c'est-à-dire la récolte qui comporte d'autres parties de la plante en plus des caryopses, a un contenu énergétique adapté à l'alimentation animale de 2.600 kcal/kg, avec une concentration

en matière sèche de 35%. Environ 45% de la matière sèche de la plante de maïs est contenue dans les parties qui ont une digestibilité et une valeur nutritionnelle plus faibles que le grain, comme les feuilles et la tige. Par conséquent, si des parties de la plante autres que le grain sont utilisées, le rendement énergétique par unité de poids est réduit, mais augmente par unité de surface.

Selon des calculs théoriques approximatifs, un hectare de pommes de terre ou un hectare de riz peut nourrir un maximum de 10-12 personnes par an. Un hectare de prairie peut faire vivre un bouvillon pendant un an.⁹³⁸ Si la prairie n'est pas très productive, un hectare ne suffit pas à nourrir une vache pendant un an.⁹³⁹

En supposant les conditions suivantes :

- un homme vivant comme un chasseur-cueilleur, c'est-à-dire menant un mode de vie que nous considérons aujourd'hui comme primitif, pourrait avoir besoin de 2.500 kcal/jour ;
- 1 kg d'aliments végétaux peut fournir 3.000 kcal ;
- Dans les régions tempérées, la production naturelle de biomasse végétale est d'environ 2.400 kg/ha par an (matière sèche) ;

Pour assurer la survie d'une personne menant un mode de vie de chasseur-cueilleur, il faut en moyenne 40 ha de terres productives. Sur cette superficie, on peut estimer que 7,5 kg d'aliments végétaux peuvent être récoltés par hectare et par an ; dans cet exemple, on considère que moins de 90 kcal par jour proviennent de protéines animales. Une famille de cinq personnes pourrait avoir besoin d'une superficie de plus de 200 ha pour survivre. Dans certaines régions de la planète, des surfaces beaucoup plus importantes peuvent être nécessaires.⁴²⁵

Dans les systèmes agricoles primitifs, où pratiquement aucune énergie fossile n'est utilisée, le rapport entre l'énergie investie et l'énergie obtenue peut être très positif, mais une quantité considérable d'heures de travail est nécessaire et le rendement par hectare est beaucoup plus faible que dans les systèmes intensifs. L'utilisation de machines et de produits chimiques (pesticides, engrais, etc.) pour produire des cultures accroît considérablement la productivité et libère les gens du travail manuel, mais augmente la quantité d'énergie nécessaire. Par exemple, un petit tracteur peut effectuer le travail de labourage en 100 fois moins de temps que le travail manuel (avec une houe), mais nécessite au moins 6 fois plus d'énergie.

La productivité moyenne des terres agricoles aux États-Unis peut être considérée comme étant de 5 t/ha par an. Les cultures de maïs les plus productives peuvent fournir 18.000 kg de biomasse par ha (de matière sèche), soit environ 9.000 kg/ha de graines. En considérant un contenu calorique de 4.000 kcal/kg, cette énergie correspond à 72 millions de kcal/ha par an, soit 0,5% de l'énergie solaire reçue en un an. On peut considérer qu'il s'agit de la productivité maximale d'un hectare planté de céréales, mais obtenue après avoir consommé de l'énergie, par exemple, par l'irrigation, les pratiques culturales, l'utilisation de pesticides, d'engrais et le transport.

Dans les écosystèmes marins, seulement 0,03% de la lumière solaire atteint les plantes aquatiques.⁴²⁵ Cela signifie que dans l'écosystème marin, la chaîne alimentaire, du phytoplancton au poisson, peut difficilement soutenir plus de 4 niveaux ; chaque hectare de zone marine peut produire 400 kcal par an à partir de sous-produits de la pêche (environ 150 g de chair de poisson) pour la consommation humaine. Il convient de rappeler qu'une grande partie des produits de la pêche est utilisée pour produire des aliments pour animaux.

La production primaire est la génération de composés organiques à partir du dioxyde de carbone présent dans l'atmosphère ou les océans, principalement par des processus photosynthétiques et, dans une moindre mesure, chimiosynthétiques.⁶²³ La production primaire est la quantité de matière organique nécessaire à la vie sur notre planète, produite par des organismes photosynthétiques tels que les plantes, les algues et certains micro-organismes. La quantité de carbone fixée par la photosynthèse, moins la quantité de carbone réémise par la respiration, constitue la production primaire nette. La production primaire nette est mesurée par

satellite et comparée à la consommation locale de nourriture, de fibres et de matières végétales. L'intensité de l'appropriation humaine de cette quantité est une mesure de la pression humaine sur le reste de la nature. Les calculs de la productivité primaire nette de la surface de la Terre effectués par satellite estiment un total de 54 Gt (milliards de tonnes), avec une variabilité annuelle d'environ 1 Gt. La photosynthèse des plantes (terrestres et marines) produit au moins 230 Gt de masse végétale par an. D'autres estimations chiffrent la production primaire nette de la planète Terre à environ 105 Gt par an. Plus de la moitié est produite dans les écosystèmes terrestres et le reste dans les océans. Des calculs différents conduisent à des estimations différentes qui donnent une mesure de l'incertitude mais aussi de l'ordre de grandeur. Cette quantité de matière organique, appelée production primaire, doit être partagée avec plusieurs millions d'autres espèces. La part que nous laissons aux non-humains est de plus en plus réduite. Au niveau planétaire, les changements dans la biosphère signifient que la disponibilité devrait diminuer.

La végétation terrestre est composée à 40% de forêts et couvre environ 23% de la surface totale de la planète. La surface des feuilles des plantes, si elle était répartie en une seule couche mince de surface photo-synthétique, serait capable de couvrir au moins 2,5 fois la surface totale du globe.⁶²⁴ L'espèce humaine s'approprie plus d'un tiers de la production primaire nette de la planète, générant des changements irréversibles et non durables.⁵⁸⁷ L'appropriation par l'homme de la production primaire nette, dans certaines régions de la planète, dépasse 60%, voire 100% (par exemple, l'agriculture intensive de plaine).⁵⁸⁷ L'appropriation par l'homme de la productivité primaire nette, en plus de retirer de la matière organique au reste de la vie sur Terre, modifie la composition de l'atmosphère, les niveaux de biodiversité, les flux d'énergie dans les chaînes alimentaires et d'importants services écosystémiques.

Une société primitive basée sur la cueillette et la chasse consomme moins de 0,1% de la production primaire nette du territoire dans lequel elle vit. Le pastoralisme implique l'appropriation d'au moins 8% et l'agriculture de plus de 48% de la production primaire nette d'un territoire.⁷⁰³

Nous nous sommes appropriés la majorité de l'énergie obtenue par photosynthèse, réduisant ainsi le nombre d'êtres vivants, puisque l'énergie est utilisée pour faire vivre une seule espèce : l'homme. Cela conduit nécessairement à une réduction de la diversité qui peut être soutenue par un système limité et confiné. Plus l'énergie disponible dans un écosystème est importante, plus le réseau trophique est florissant et complexe.

Une question à laquelle il est difficile de répondre est la suivante : quel pourcentage de la production primaire l'humanité peut-elle se permettre de consommer sans provoquer l'effondrement des écosystèmes ? Nous pouvons raisonnablement supposer que nous avons déjà dépassé ce seuil. La réduction des services de la nature enregistrée en raison de l'appropriation de la production primaire nette met également l'espèce humaine en difficulté. Cela constitue une autre limite planétaire sous-estimée, car nous sommes entrés dans une zone d'insécurité et d'instabilité. Des mécanismes d'amplification très délétères pourraient facilement être déclenchés, tels qu'une augmentation du taux de perte de sols fertiles, de la biodiversité et du changement climatique.

Il est important de rappeler que l'espèce humaine, en 2000, s'était déjà approprié au moins 35% de la surface terrestre libre de glace, la transformant de manière irréversible en terres agricoles.⁵⁸⁷ En 40 ans, la production agricole a doublé mais la surface occupée par l'agriculture a augmenté de 12%.⁵⁸⁷ Cette différence entre les deux indicateurs est possible grâce à l'utilisation de combustibles fossiles et de technologies agronomiques (engrais, pesticides, irrigation, mécanisation) qui génèrent de nombreux effets négatifs sur l'environnement.

La croissance exponentielle de la population humaine, avec l'augmentation encore plus rapide de la consommation de ressources finies, laisse présager des défis impossibles pour l'humanité. Au cours des 50 années précédant 2011, la population humaine a augmenté de 128% (de 3 à 6,9

milliards), les surfaces cultivées de 33% et la production agricole de 57%. La croissance rapide de l'exploitation des ressources de la planète a également eu de nombreux impacts négatifs sur les pollinisateurs et la biodiversité végétale. Pour soutenir la croissance attendue de la consommation, il ne suffira pas d'investir plus d'énergie et de ressources pour obtenir plus de nourriture, mais il sera nécessaire de cultiver de nouvelles zones. À mesure que la quantité de ressources utilisées par unité de surface augmente, dans le but de produire des produits agricoles, l'augmentation des rendements diminue par unité de ressources apportées (par exemple, énergie, engrais, pesticides).⁶¹⁵ Par conséquent, pour obtenir des augmentations significatives, il est nécessaire de disposer de nouvelles surfaces à cultiver, car l'augmentation de la productivité d'une culture diminue à mesure que l'utilisation des ressources augmente. Il est difficile d'imaginer doubler la production alimentaire avant 2050 sans compromettre de manière irréversible la biosphère et nos chances de survie.

LA CONSOMMATION DE L'ÉNERGIE GÉNÉRÉE PENDANT DES MILLIONS D'ANNÉES : LE SOLEIL ENTERRÉ

L'énergie solaire, grâce à la photosynthèse chlorophyllienne et à des processus qui ont duré des millions d'années, a été stockée dans des dépôts de carbone solide, liquide et gazeux qui peuvent être extraits du sous-sol. L'énergie solaire est déposée dans le sous-sol sous forme d'énergie potentielle, c'est-à-dire de liaisons chimiques, principalement entre les atomes de carbone et les atomes de carbone avec les atomes d'hydrogène. La quantité d'énergie disponible dépend donc de la teneur en carbone, des liaisons entre les molécules de carbone et avec l'hydrogène. En réalité, l'énergie contenue n'est pas toujours facilement utilisable, car elle doit être extraite du sous-sol et, lors de la transformation, une grande partie peut être perdue sous forme de chaleur ; il faut également tenir compte d'autres consommations comme le transport.

Les combustibles fossiles sont issus de la photosynthèse chlorophyllienne (l'organisation du carbone) et mettent un million de fois plus de temps à se reformer que le rythme actuel de consommation : au moins 170.000 kilos par seconde (1.110 barils de 159 kg chacun par seconde).⁹³⁶

La révolution industrielle a été rendue possible par la consommation très rapide de grandes quantités d'hydrocarbures formés à partir du rayonnement solaire : nous brûlons l'énergie stockée pendant des millions d'années. En conséquence, nous rejetons du dioxyde de carbone dans l'atmosphère à un rythme bien supérieur à la capacité des plantes à le réabsorber. Depuis 1997, l'utilisation de combustibles fossiles a produit 400 fois plus de dioxyde de carbone que la productivité primaire de la Terre ne peut convertir en biomasse végétale par la photosynthèse chlorophyllienne.⁹³⁷

La consommation d'énergie a augmenté de 2,5% par an entre 1970 et 1995.^{97, 425} Globalement, la consommation mondiale d'énergie a presque doublé entre 1973 et 2009 : elle est passée de 4,6 à 8,4 milliards de tonnes d'équivalent pétrole.⁵

Les combustibles fossiles fournissent 88% de l'énergie mondiale et permettent un système de production alimentaire inefficace : il faut au moins 10 à 15 calories d'énergie pour produire un seul aliment.⁵ On peut affirmer que l'agriculture est aujourd'hui une industrie qui transforme les combustibles fossiles en aliments de manière inefficace. L'agriculture s'est développée depuis environ 10.000 ans, et aujourd'hui encore, certaines personnes pratiquent des méthodes très primitives qui n'utilisent pas d'énergie fossile. À l'échelle mondiale, 77% de l'énergie potentiellement renouvelable provient de la combustion de plantes, de bois et de déchets.¹⁵ Dans la plupart des pays en développement, le moyen le plus courant de chauffer les maisons et de cuisiner est de brûler la biomasse ligneuse provenant du milieu environnant. En Afrique, plus de 80% de l'énergie dans les zones rurales provient du bois de chauffage récolté

dans un rayon de quelques kilomètres. ¹⁹ Une forêt exploitée de manière durable peut fournir trois tonnes de biomasse ligneuse sèche par hectare et par an (de l'énergie sera dépensée pour la coupe et le transport). La biomasse peut être considérée comme renouvelable si elle est exploitée à un rythme inférieur à sa capacité de régénération naturelle. En outre, il convient d'établir une distinction entre la biomasse obtenue à partir de systèmes totalement artificiels, tels que les cultures agricoles, et la biomasse obtenue à partir d'écosystèmes naturels (par exemple, les forêts primaires). Dans ce dernier cas, le concept de renouvelabilité est certainement beaucoup plus fragile, et dans le premier cas, la consommation d'énergie peut être supérieure à l'énergie obtenue (par exemple, par la culture du maïs).

Les niveaux actuels de consommation peuvent peut-être être maintenus, dans le cas du pétrole, pendant encore 40 ans, le gaz naturel et le charbon pendant beaucoup plus longtemps (aux niveaux actuels de consommation). Le coût environnemental généré par la consommation de combustibles fossiles doit être bien plus préoccupant que leur disparition. Le désastre environnemental de la combustion générera des effets limitatifs avant la fin des combustibles fossiles eux-mêmes. Au rythme actuel de consommation, les énergies non renouvelables telles que le pétrole, le gaz naturel (méthane) et l'énergie nucléaire ne seront plus, tôt ou tard, bon marché. Il faut donc chercher des solutions le plus tôt possible, afin que le changement soit progressif et géré pacifiquement.

L'AGRICULTURE INDUSTRIELLE ET CERTAINES LIMITES PLANÉTAIRES : CLIMAT, EAU ET SOL

L'agriculture n'a jamais été naturelle, elle est même la principale cause de la déforestation. Elle ne peut pas du tout être considérée comme une forme de protection des terres. L'agriculture industrielle repose sur l'utilisation de poisons, d'engrais et de semences qu'il faut acheter chaque année. La monoculture intensive a simplifié la biodiversité des paysages agricoles et a entraîné l'annulation de connaissances séculaires qui ont toujours permis de se nourrir et de subsister. L'extinction de ces connaissances signifie devenir complètement dépendant des grandes entreprises, appauvrir les écosystèmes ou les détruire : pour une grande partie de la population agricole mondiale, cela a signifié la pauvreté et la faim. ¹⁷⁵

L'environnement agricole est devenu si hostile aux abeilles que les espaces urbains des villes leur offrent un environnement plus sûr et plus productif. ²⁰⁶ Paradoxalement, les abeilles en ville disposent d'une plus grande quantité de nectar et de pollen que dans les environnements agricoles intensifs. Elles sont également moins exposées aux pesticides. Pour donner un exemple, la ville de Londres compte environ 8,3 millions d'arbres, 30.000 jardins, 13.000 espèces de flore et de faune sauvages. ^{35, 196} L'apiculture urbaine se répand non seulement pour des raisons économiques mais aussi pour des raisons sociales et éducatives.

Les pratiques agricoles qui nuisent également aux pollinisateurs sont la fertilisation, le labourage, le travail du sol, la distribution de pesticides, le feu, la destruction des zones non cultivées et semi-naturelles et l'élevage. Les plantes génétiquement modifiées peuvent produire du pollen et des nectars dans des quantités et des qualités qui sont négativement altérées pour les abeilles. Des principes simples et banals, tels que la restitution de la fertilité prise au sol par les récoltes, ne sont plus respectés. La capacité naturelle à nourrir la vie est compromise. L'alternative pourrait être l'agro-écologie, qui reste en grande partie à concevoir, mais qui est la seule alternative à des processus irréversibles tels que la diminution de la capacité à produire des aliments en raison de la perte de fertilité des sols et de la destruction de la biodiversité.

Cette modification massive de l'environnement par l'homme génère également des changements qui peuvent être négatifs pour les apiculteurs. Par exemple, les oiseaux migrateurs insectivores, en l'absence d'autres sources de nourriture, peuvent concentrer leur attention sur les

abeilles (par exemple, les guêpiers, *Merops apiaster*, qui sont très craints par les apiculteurs mais sont des espèces protégées).

L'apiculture industrielle moderne dépend, comme l'agriculture intensive, d'un apport important d'énergie fossile. Cet aspect, à savoir le rapport entre l'apport d'énergie fossile et la production d'énergie sous forme de nourriture, n'est actuellement pas pris en considération. La production agricole consomme beaucoup plus d'énergie (en termes d'énergie fossile) qu'elle n'en obtient (en termes de glucides, de protéines et de graisses alimentaires) et l'énergie fossile ne sera pas bon marché dans les prochaines années : le pétrole pourrait devenir rare et très précieux dans moins de 40 ans. C'est une autre raison essentielle pour accélérer le changement nécessaire dans la gestion de l'apiculture également.

L'agriculture est responsable d'environ 44% des émissions de méthane et de 82% des émissions d'oxyde nitreux. Globalement, entre un quart et un tiers de toutes les émissions de gaz à effet de serre proviennent du secteur agricole qui, en même temps, est aussi l'un des secteurs de l'économie les plus touchés par le changement climatique.⁶⁸⁰ Concilier la demande prévue d'une augmentation de la production alimentaire d'au moins 60 à 70% avant 2050 avec la nécessité de réduire la progression du changement climatique, la destruction de la biodiversité, la dégradation du cycle de l'eau et la dégradation des sols est un défi impossible à relever. Il est vrai qu'au fil du temps, en plus de 50 ans, la production de végétaux et d'aliments d'origine animale a augmenté, mais la disponibilité par habitant, pour la majeure partie de la population mondiale, a diminué.⁷⁴⁹ Il est beaucoup plus probable que la production alimentaire diminue en raison du changement climatique et de la dégradation de la biosphère.

L'agriculture est également le secteur qui consomme le plus d'eau (70% de l'eau douce prélevée est retournée contaminée) et qui est en même temps le plus sensible aux altérations du cycle de l'eau et aux phénomènes tels que les sécheresses, les inondations et les débordements. À cet égard, il est utile d'attirer l'attention sur le fait que, pendant quelques mois, environ un quart des grands fleuves de la planète n'atteignent plus la mer.⁶⁸⁰ Le cycle de l'eau est à son tour affecté par le changement climatique. Nous avons créé des mécanismes interdépendants qui amplifient négativement en se dégradant irréversiblement.

L'agriculture est également la principale cause de dégradation des sols : plus de 35% de la surface de la terre est occupée par l'agriculture. L'agriculture a entraîné la modification du cycle de l'azote et du phosphore. Il est important de remarquer que le phosphore est une ressource non renouvelable et qu'il est extrait du sous-sol principalement par trois nations : États-Unis, Chine et Maroc. La Chine, en 2016, a produit environ 50% du phosphore commercialisé sur la planète et le Maroc détient probablement les trois quarts des réserves connues, sous forme de roches. Le recyclage du phosphore, par l'utilisation du fumier, pourrait réduire la dépendance à l'égard de cette source non renouvelable. Aux États-Unis, l'utilisation d'un tiers du fumier produit pourrait probablement couvrir les besoins en phosphore des céréales : moins de 5% des terres cultivées américaines reçoivent de la matière organique sous forme de fumier.⁷⁶¹ La majeure partie du phosphore extrait du sol se retrouve dans les rivières, les lacs et les mers, créant ainsi des problèmes majeurs tels que l'eutrophisation.

Afin de réduire le changement climatique, la destruction de la biosphère et de réintégrer un espace de fonctionnement sûr, l'agriculture devrait consommer beaucoup moins d'azote et de phosphore, beaucoup moins d'eau, beaucoup moins d'énergie fossile, augmenter la fertilité des sols et protéger la biodiversité. Il est difficile d'atteindre ces résultats car la croissance démographique actuelle et l'augmentation prévue de la consommation exigent exactement le contraire. Les pratiques qui vont à l'encontre de la durabilité, telles que l'intensification des monocultures, l'utilisation de combustibles fossiles, l'utilisation de pesticides, l'irrigation, la fertilisation chimique, la déforestation et le travail du sol, se répandent, rendant la production alimentaire plus vulnérable et très dommageable pour la biosphère. La révolution verte est nécessaire et ne peut être réalisée ou même imaginée au rythme actuel de croissance des

demandes du marché. La réduction de la demande des consommateurs et la réduction de la population sont liées et constituent des objectifs prioritaires pour atteindre les réductions des pressions négatives nécessaires pour sauver la biosphère. Assumer un développement durable sans réduction de la consommation et de la population est irréaliste. La surpopulation et le consumérisme sont les deux questions clés dont dépend le succès de toute stratégie visant à sauvegarder les systèmes naturels dont nous dépendons. L'objectif primordial pourrait se résumer à assurer la prospérité et la sécurité sociale sans augmenter la consommation et les pressions sur l'environnement.

L'AGRICULTURE EST UNE INDUSTRIE QUI TRANSFORME LE PÉTROLE EN NOURRITURE

Dans le secteur agricole, de 1970 à 2010, la productivité moyenne a augmenté, grâce à la chimie et à la technologie, de 2,4 tonnes à 4,6 tonnes par hectare.¹⁰⁴ La moyenne mondiale des calories disponibles sous forme de nourriture est d'environ 2.800 kcal par jour et par habitant, tandis qu'aux États-Unis, elle atteint 3.800 kcal. Aux États-Unis, la production alimentaire fournit environ 1.500 kg/an par personne, tandis qu'en Chine, cette quantité est environ deux fois moindre.²⁶³

En 2003, une moyenne de 158 kg de blé, 167 kg de légumes, 60 kg de fruits et 60 kg de viande (y compris le poisson) était théoriquement disponible pour chaque habitant de la planète.²⁶³ En réalité, nous savons que cette répartition n'est pas homogène et que la disponibilité moyenne actuelle, estimée à environ 2.800 kcal par jour et par habitant, n'est pas durable, car elle génère des changements irréversibles.⁵

Au cours du vingtième siècle, la superficie des terres cultivées a augmenté de 30%, mais la quantité de récoltes a été multipliée par six en raison d'une multiplication par 150 de l'énergie utilisée dans l'agriculture.⁶ Selon d'autres estimations plus optimistes, la production agricole a été multipliée par six au cours du XXe siècle grâce à une consommation d'énergie multipliée par 80.³⁷ C'est pourquoi on peut affirmer que le système agricole actuel n'est rien d'autre qu'une énorme industrie qui détruit les écosystèmes afin de transformer le pétrole en nourriture. Le résultat est un changement irréversible et non durable des écosystèmes. La quantité d'énergie obtenue est toujours inférieure à celle utilisée. Les pratiques agricoles sont probablement responsables de plus d'un tiers de l'ensemble des émissions de gaz altérant le climat.

Aujourd'hui, les cultures de la planète peuvent théoriquement nourrir une moyenne d'environ quatre personnes par hectare ; en 1900, elles nourrissaient trois personnes pour deux hectares. L'agriculture est devenue dépendante du pétrole, ce qui permet de produire des aliments dont le contenu énergétique est bien inférieur à la quantité d'énergie investie pour les produire. Pour élever une vache laitière de 500 kg, on estime que 1.000 litres d'huile sont nécessaires et que pour produire 1 kg de veau, 7 litres d'huile sont nécessaires.⁶ Les légumes produits en serre peuvent avoir un contenu énergétique 50 fois inférieur à l'énergie utilisée pour les produire.

Pour sécher (réduire la teneur en eau) une denrée alimentaire, il faut consommer autant d'énergie que celle contenue dans la denrée. On peut estimer grossièrement que 3.542 kcal/kg sont nécessaires pour déshydrater une denrée alimentaire et que plus de 1.500 kcal/L peuvent être nécessaires pour sécher du maïs.⁴²⁵ Théoriquement, 620 kcal sont nécessaires pour évaporer un litre d'eau d'un récipient ouvert, mais l'énergie réellement requise pour éliminer 1 L d'eau d'un aliment est supérieure à cette valeur de référence.

La production d'une boîte en aluminium contenant 455 g de maïs doux fournissant environ 375 kcal peut nécessiter plus de 3.000 kcal, dont 450 kcal pour la production, 158 kcal pour le transport et plus de 1.000 kcal pour l'emballage.⁴²⁵ La production des seuls contenants

alimentaires peut nécessiter plus d'énergie que les aliments eux-mêmes, sans parler de la gestion des déchets et des conséquences environnementales.

L'un des acquis de l'humanité généré par l'utilisation de l'énergie fossile concentrée est la possibilité d'être employé à d'autres tâches que la production alimentaire. Actuellement, au moins 50% de la population mondiale est employée principalement dans l'agriculture, mais dans les pays industrialisés, il suffit d'engager une petite fraction de la population dans ce secteur en utilisant des énergies non renouvelables : 4% ou moins aux États-Unis.¹⁴⁷ L'agriculture intensive, en dévorant les combustibles fossiles, a produit plusieurs avantages comme la possibilité pour une grande partie de la population de ne pas se soucier de produire les aliments dont elle a besoin. Mais de nombreux problèmes ont été générés, tels que la réduction irréversible de la biodiversité, la pollution de l'eau, l'érosion des sols et la sélection d'organismes résistants aux pesticides. Malgré l'utilisation annuelle de plus de 3 millions de tonnes de pesticides par an, les adversités que l'on voudrait limiter continuent de générer une perte d'environ 40% de l'ensemble de la production végétale.²⁶³

Si le système agricole adoptait plus fortement les règles appliquées aux méthodes de production biologique, certains impacts négatifs tels que les émissions qui altèrent le climat pourraient être réduits. Ces avantages, selon certaines études, pourraient être générés par des pratiques simples telles que la réduction de l'utilisation d'engrais chimiques, qui peuvent être remplacés par des engrais organiques tels que le fumier.¹⁰³ Les rendements du système de production biologique par unité de surface sont inférieurs à ceux de l'agriculture traditionnelle, mais la consommation d'énergie est beaucoup plus faible. Ainsi, un avantage environnemental est généré en termes d'économies d'énergie. En 2017, la surface agricole biologique mondiale était d'environ 70 millions d'hectares, dont 13 millions d'hectares en Europe (2017) et 2 millions d'hectares en Italie (2018).^{98, 99, 102}

Certains systèmes de production connaissent des taux de croissance très rapides et, par conséquent, non durables : au cours des 40 dernières années, la production mondiale d'œufs a augmenté de 350% et le commerce de volailles de 3.200% (la Chine est le premier producteur mondial d'œufs).⁸ Le système agricole actuel, en Italie et dans tous les pays les plus industrialisés, génère de nombreux impacts négatifs :

- L'appauvrissement génétique, extinction des écosystèmes et des espèces sauvages.
- La destruction chimique de la microfaune des sols et des êtres vivants en général, due à l'utilisation délibérée de milliers de molécules certainement dangereuses pour l'homme (engrais, pesticides, déchets, produits de combustion).
- La destruction physique du sol par l'irrigation, le labourage et d'autres pratiques agricoles.
- La pollution de l'eau et la réduction des réserves d'eau douce (eaux souterraines et de surface).
- La déforestation est également l'une des causes importantes de la modification de la composition de l'atmosphère.
- La pollution atmosphérique, par exemple, due à l'élevage et à l'utilisation d'énergies non renouvelables.

En définitive, le système agricole actuel présente de nombreux avantages, mais il n'est pas durable et ne continue d'être possible que grâce à des contributions exigeantes et énormes en termes d'énergie et de technologie ; il s'agit d'une agro-désastre écologique : malheureusement, l'histoire humaine a déjà enregistré l'extinction de communautés en raison d'une mauvaise agriculture.^{91, 208} Par conséquent, il faudra investir de plus en plus d'énergie pour obtenir la même quantité de nourriture, qui contiendra beaucoup moins d'énergie que celle investie dans sa production.

PLUS DE 50% DES LÉGUMES CULTIVÉS NE NOURRIRONT PERSONNE

L'un des résultats de l'application des principes de l'agriculture industrielle chimique, dont beaucoup bénéficient, est la diminution du nombre de personnes qui doivent s'occuper de la production de nourriture : moins de 5% dans les pays les plus riches. Pour mieux comprendre l'ampleur du changement, entre les années 1960 et 2016, au Canada (surface agricole de plus de 64 millions d'hectares, en 2016), la taille moyenne d'une exploitation est passée de 163 ha à 315 ha et aux États-Unis (surface agricole d'environ 386 millions d'hectares, en 2007) de 142 ha à 169 ha.⁴⁴⁴ Au Canada, 70% des zones humides et 75% des prairies ont été détruites. L'étendue des monocultures a augmenté de façon spectaculaire, la biodiversité des campagnes a diminué et l'utilisation des pesticides a augmenté. En même temps, entre les années 1960 et 1990, le nombre de personnes entretenues par un seul agriculteur a été multiplié par quatre : de 1 agriculteur pour 28 habitants à 1 pour 100 habitants.⁴⁴⁴

Lorsque nos ancêtres étaient chasseurs-cueilleurs, ils avaient besoin, selon l'écosystème, d'au moins 100 hectares productifs par habitant pour survivre. Aujourd'hui, avec l'agriculture intensive, un hectare pourrait suffire à faire vivre au moins deux personnes suivant un régime végétarien pendant un an.

L'agriculture intensive profite principalement à 1,5 milliard de personnes, c'est-à-dire à une minorité de la population mondiale : la partie la plus riche de la société. Quatre-vingt pour cent de la nourriture mondiale est produite par des ménages agricoles, et trois quarts des exploitations ont une superficie inférieure à un hectare. À l'autre extrême, on trouve des certaines communautés américaines où moins de 2% de la population est impliquée dans l'agriculture. Les aspects cruciaux qui distinguent ces deux types d'agriculture, l'agriculture industrielle de l'agriculture familiale (pratiquée principalement à des fins d'autosubsistance) sont très évidents : la première consomme plus de 10 calories d'énergie fossile pour obtenir un aliment et en produit moins de la moitié par unité de surface. Les agriculteurs familiaux cultivent plusieurs espèces sur la même exploitation et sont donc plus efficaces, plus résilients et ont des rendements à l'hectare beaucoup plus élevés. Malgré l'utilisation accrue de pesticides dans l'agriculture chimique, entre 30 et 40% des récoltes sont perdues à cause des maladies et des parasites, et au moins un autre quart des aliments finissent à la poubelle (entre la production et la consommation). Il est donc réaliste de dire que même plus de 50% des légumes cultivés ne serviront à nourrir personne.⁷⁶¹ Il s'agit d'estimations, et aussi approximatives soient-elles, elles donnent une idée des déchets. Les systèmes qui utilisent moins d'intrants externes (énergie, pesticides, engrais) et réduisent les déchets doivent être encouragés.

L'EMPREINTE ÉCOLOGIQUE DE L'ESPÈCE HUMAINE : NOUS DEVRIONS DEVENIR PLUS VÉGÉTARIENS

Tenter de communiquer l'immensité de l'impact de l'espèce humaine sur la biosphère n'est pas chose aisée alors que les inégalités et le gaspillage de notre modernité se résument bien à quelques chiffres : les personnes en surpoids et obèses (au total au moins 1,9 milliard) sont plus du double des personnes souffrant de malnutrition.³⁶

Déjà en 2011, au moins 38% des terres libres de glace dans le monde, soit environ 5 milliards d'hectares, étaient utilisées pour la culture et l'élevage. À l'échelle mondiale, le secteur de l'élevage est probablement le plus gros utilisateur de terres : directement ou indirectement, la production animale moderne utilise au moins 30% de l'ensemble des terres non recouvertes de glace et 70% de toutes les terres agricoles.¹¹⁴ En Europe, 75% des terres agricoles sont utilisées pour produire des aliments pour animaux.

Probablement 40 à 50% de toute la production céréalière sur Terre sert à nourrir le bétail pour obtenir 2% de toutes les calories que nous utilisons.⁹⁶ Aux États-Unis et en Europe, plus de la moitié des céréales sont consommées par les animaux d'élevage : 59% et 56% respectivement. En Asie et en Afrique, cependant, moins d'un quart des céréales produites sont utilisées comme aliments pour animaux, soit 22% et 13% respectivement, et la plupart sont utilisées pour la consommation humaine.

Pour produire 50 kg de protéines animales, il faut consommer jusqu'à 800 kg de légumes, et un hectare d'épinards fournit 25 fois plus de protéines qu'un hectare de céréales pour la viande. On peut dire sans se tromper que les exploitations d'élevage se sont disputé les terres avec une grande partie de la population mondiale. Ces informations devraient faire réfléchir au gaspillage des ressources nécessaires pour maintenir un régime alimentaire riche en sous-produits animaux pour une fraction de la population mondiale qui tombe malade en mangeant trop.

La production de protéines animales nécessite 2,5 à 50 fois plus d'énergie que la production de protéines végétales, ce qui entraîne une augmentation des émissions de gaz à effet de serre.¹¹⁴ Pour produire 1 kilocalorie (kcal) de steak de bœuf, il faut 100 kilocalories de nourriture. Pour produire 1 kilocalorie de nourriture, il faut jusqu'à 40 kilocalories de combustibles fossiles. Le rendement est très faible et si l'on tient compte de l'ensemble de la consommation, il peut être inférieur à 1% : sélection génétique des semences, achat des plants, culture, transport, élevage, transformation, chaîne du froid, conditionnement, élimination des déchets. La consommation d'énergie peut être augmentée par certaines pratiques telles que le transport sur de longues distances ou l'utilisation de la chaîne du froid : même 66% de l'énergie nécessaire pour obtenir de la viande est nécessaire pour la production et le transport des aliments pour animaux ; pour conserver 1 kg de viande ou de poisson à -18°C, il faut au moins 265 kcal par mois.¹¹⁴

La production animale sur la planète est responsable des émissions suivantes :¹¹⁴

- 9% des émissions de dioxyde de carbone ;
- 35 à 40% des émissions de méthane, dont l'effet sur le réchauffement climatique est 23 fois supérieur à celui du dioxyde de carbone ;
- 64% des émissions d'ammoniac, un gaz qui contribue de manière significative aux pluies acides et à l'acidification des écosystèmes ;
- 65% des émissions d'oxyde nitreux, un gaz qui a un effet 296 fois plus important que le dioxyde de carbone sur le réchauffement de la planète.

La production de denrées alimentaires d'origine animale génère davantage de gaz altérant le climat que le secteur des transports.²⁷ L'élevage d'une vache adulte en un an produit la même quantité de gaz nocifs pour le climat qu'une voiture parcourant 70.000 km.

Les autres questions auxquelles il faut réfléchir sont les suivantes :

- L'augmentation de l'élevage favorise la déforestation : probablement 70% des terres déboisées en Amazonie ont été transformées en pâturages pour le bétail.
- Les exploitations agricoles utilisent au moins 8% de toute l'eau douce disponible. Un kilogramme de viande de bœuf peut nécessiter plus de 15.500 litres d'eau qui sont renvoyés contaminés dans l'environnement. Un kilogramme de viande de poulet peut nécessiter plus de 3.900 litres.
- Les maladies transmises par le bétail ont touché au moins 2 milliards de personnes en 2012, principalement dans les pays pauvres.⁵
- Les antibiotiques sont utilisés pour prévenir certaines zoonoses bactériennes. Selon l'Organisation mondiale de la santé, plus de 50% des antibiotiques produits sont utilisés dans les exploitations agricoles.¹¹⁴
- Le travail de l'éleveur présente de nombreux risques pour la santé. Le *rapport sur la reconstitution des accidents mortels dans la région du Piémont de 2009 à 2010* indique que 22% de tous les accidents mortels sont liés à l'élevage.

Il faut réduire la consommation de viande dans les pays riches (et donc le nombre d'animaux élevés) et réduire la surface agricole consacrée à la production d'aliments pour animaux. Le marché permet que les évaluations économiques soient faussées par des aides financières qui permettent de fixer des prix inférieurs aux coûts encourus. Les coûts environnementaux ne sont pas pris en compte, car ils sont laissés aux générations futures ou sont répartis de manière silencieuse dans la communauté (par exemple, eutrophisation, déforestation, pollution de l'eau). Il faut environ sept kilos de blé pour produire un kilo de viande rouge, et au moins deux kilos pour produire un kilo de poulet.¹⁰⁴ La modification du régime protéique peut conduire à une réduction de la quantité d'énergie et de terres utilisées pour l'alimentation des animaux. La réduction de la consommation de viande, notamment dans les pays où l'on en consomme plus de 100 g par jour, pourrait avoir des effets bénéfiques directs sur la santé :⁵³

- réduire le risque de maladie cardiaque,
- réduire l'obésité (l'espérance de vie d'une personne obèse peut être réduite de 10 ans),
- réduire la probabilité d'avoir un cancer de l'intestin ou un diabète de type 2.

Réduire la consommation de viande rouge à moins d'une fois par semaine pendant des décennies peut contribuer à augmenter l'espérance de vie de 3,6 ans.⁸⁷³

On estime que l'ensemble des êtres vivants de la planète représente 550 gigatonnes de carbone (1 gigatonne équivaut à 1 milliard de tonnes). La majorité, environ 450 Gt, sont des plantes. Le reste est constitué de bactéries (70 Gt), de champignons (12 Gt), d'organismes unicellulaires (7 Gt), d'algues (4 Gt) et d'animaux (2 Gt). L'espèce humaine pèse 0,06 Gt, soit 0,01% du carbone total.

Notre impact sur la planète est dévastateur : depuis l'aube de la civilisation, l'homme a causé la perte de 83% de tous les mammifères sauvages, de 80% des animaux marins et de 50% des plantes.^{800, 801} Les animaux d'élevage représentent une biomasse au moins 14 fois supérieure à celle des mammifères sauvages, et au moins 50 fois supérieure à celle de tous les oiseaux sauvages.^{799, 801} Plus de 70 milliards d'animaux d'élevage sont tués chaque année dans le monde pour la consommation humaine, la plupart étant des poulets.⁸⁰² Pour avoir une idée de l'empreinte écologique générée par l'élevage intensif en Europe, on peut raisonnablement estimer que 7 fois plus de terres que celles du Vieux Continent dans d'autres pays doivent être cultivées pour produire des aliments pour animaux.⁸³⁶ Au moins 20% de l'ensemble de la biomasse terrestre est constituée d'animaux d'élevage, ce qui nécessite l'exploitation de plus de 30% des terres qui étaient autrefois occupées par des espèces sauvages. Les êtres humains, ainsi que les animaux d'élevage, représentent au moins un quart de la biomasse animale terrestre.³⁶

La surface terrestre non couverte par les océans est d'environ 149 millions de kilomètres carrés (29% de la surface terrestre totale). Seuls 71% de cette surface (104 kilomètres carrés) sont utilisables par l'homme, le reste étant occupé par des glaciers, des déserts et des terres arides. À l'échelle mondiale, 50% de la surface utile de la Terre est utilisée pour nourrir le bétail et 37% (39 millions de kilomètres carrés) est couverte de forêts et de zones boisées. Ainsi, sur les 51 millions de kilomètres carrés utilisés par l'agriculture, 77% (40 millions de kilomètres carrés) sont utilisés directement ou indirectement pour produire des aliments pour animaux.⁸⁰³ Seuls 11 millions de kilomètres carrés de la surface de la terre sont utilisés à des fins agricoles autres que l'alimentation du bétail. La plupart des terres agricoles de la planète sont occupées par des espèces qui sont non seulement étrangères, mais souvent non naturelles parce qu'elles ont été créées par l'ingéniosité humaine, comme les céréales et le soja génétiquement modifiés.

L'utilisation de plus de 50% de l'énergie solaire captée par les plantes pour répondre aux besoins de l'humanité entraîne une réduction de la biodiversité. En conséquence, l'espèce humaine s'est appropriée la plupart des ressources naturelles de la planète au détriment de toutes les autres, modifiant de manière irréversible l'équilibre de la nature. L'innovation technologique nous a permis de devenir des parasites dangereusement efficaces.

On peut estimer qu'il y a 11,4-11,6 milliards d'hectares biologiquement productifs disponibles sur la planète, répartis entre terre et mer ; en divisant ce nombre par le nombre de personnes vivantes, environ 7,8 milliards, on obtient une moyenne de 1,4-1,5 hectare de surface bio-productive par personne.⁵ Ainsi, la bio-capacité (empreinte écologique) que la Terre est capable de supporter est inférieure à 1,5 ha par habitant.⁶ En réalité, la répartition de l'empreinte écologique sur la planète n'est pas homogène, car certains pays consomment beaucoup plus de ressources par habitant : elle peut dépasser 8 hectares par personne dans les zones économiquement les plus riches du monde. En Italie, l'empreinte écologique est estimée à 4,5 ha par habitant et par an, et en Europe à 4,7 ha par habitant et par an.¹⁹ La bio-capacité disponible en Italie est inférieure à 1 ha par habitant, donc nous générons une consommation de sol dans d'autres pays et hypothéquons l'avenir.²⁷ La consommation de sol à laquelle une fraction de la population mondiale est heureusement habituée ne peut être étendue à tous les habitants de la planète. Il s'agit de moyennes, mais une grande partie de la population mondiale, au moins un milliard de personnes, meurt parce qu'elle n'a pas accès à une nourriture suffisante pour survivre. Les changements les plus significatifs sont intervenus avec le début de l'ère industrielle, conventionnellement fixé à 1750, lorsque la technologie s'est imposée. À cette époque, moins de 9 millions de km² de la surface de la planète étaient probablement consacrés à l'agriculture et à l'élevage, soit moins que la surface agricole actuelle de l'Italie. En 2011, 38% des terres libres de glace de la planète étaient utilisées pour la culture et l'élevage, soit environ 5 milliards d'hectares (50 millions de km²). À titre de référence, l'Europe, qui occupe 2% de la superficie terrestre, couvre un total d'environ 10,4 millions de km².

D'ici 2050, la planète devrait accueillir 2 à 3 milliards d'êtres humains supplémentaires et, au rythme actuel de croissance de la demande mondiale d'aliments d'origine animale, il faudra théoriquement plusieurs dizaines de milliards d'animaux d'élevage par an, en plus de ceux qui sont déjà élevés. Aujourd'hui, la superficie des terres cultivées par habitant sur la planète est d'environ 0,23 ha par an, ce qui est une moyenne, les pays à revenu élevé disposant de plus de terres par habitant.⁸⁰⁴ Pour soutenir la nouvelle augmentation de la consommation prévue en raison du taux actuel de croissance démographique et de la demande accrue d'animaux d'élevage, une Planète ne suffit pas. Il est probable que si, à l'avenir, au moins 40% de la surface actuellement consacrée à l'alimentation des animaux d'élevage était consacrée à la production de nourriture pour les humains, 9 milliards d'êtres humains pourraient être nourris. Il est donc crucial de réduire la consommation de viande, d'œufs, de lait et de produits laitiers pour éviter l'effondrement du système agroalimentaire.⁸⁰⁵

Les données qui viennent d'être résumées sont approximatives, mais elles donnent une bonne idée de la manière dont l'homme, bien que petit en termes de biomasse et jeune par rapport à la planète, a réussi à la modifier profondément de manière autodestructrice. Un obstacle majeur au changement est constitué par les contraintes structurelles découlant de la biochimie et de la physiologie, qui sont les mêmes qu'il y a 200.000 ans : les adaptations génétiques, culturelles et sociales sont beaucoup plus lentes que le rythme des innovations technologiques. Le cerveau est le même que celui de nos ancêtres primitifs et n'est donc pas préparé aux changements auto-induits.

LES OCÉANS SONT EN DANGER

Les mers de la planète remplissent des fonctions essentielles telles que l'absorption de la chaleur, la production de la majeure partie de l'oxygène que nous respirons, l'absorption d'au moins un tiers des émissions de dioxyde de carbone, la stabilisation du climat, la fourniture de nourriture et de soutien économique à des milliards de personnes. Malgré leur immensité, ils sont gravement menacés. Les océans sont contaminés par les matières plastiques, les dérivés du

pétrole, les métaux, les produits agricoles, les composés de l'industrie chimique, les produits pharmaceutiques et les eaux usées civiles et industrielles (eaux d'égout). La plupart des polluants atteignent les mers par le biais des rivières (par exemple, les plastiques, les pesticides, les produits pharmaceutiques, les engrais), tandis que d'autres proviennent de l'atmosphère (dioxyde de carbone).

Plus de 10.000 composés chimiques sont utilisés dans la production de produits pharmaceutiques, de produits de nettoyage et de cosmétiques. Certains de ces produits contiennent des micro-plastiques. Les effets de ces substances sur les organismes aquatiques sont en partie inconnus : certains composés de protection solaire (benzophénone-3) sont soupçonnés d'être toxiques pour les larves de certaines espèces de coraux (elles deviennent immobiles et des dommages à l'ADN sont enregistrés).¹²⁷¹

Au moins 10 millions de tonnes de plastique sont rejetées dans les mers chaque année. 420 millions de tonnes de plastique sont produites chaque année, dont la plupart ne sont utilisées qu'une seule fois et deviennent des déchets moins d'un an après leur production, tout en étant difficilement biodégradables.¹²⁷¹ Au moins 6% des filets de pêche, 9% des systèmes de capture et 29% des lignes de pêche utilisés pour capturer des organismes marins restent dans la mer. L'une des conséquences négatives est que l'on peut trouver 20 microparticules de plastique pour 10 g de matières fécales humaines.¹²⁷¹

Une autre pollution très préoccupante est le mercure, qui provient de diverses sources telles que la combustion du charbon et l'extraction de l'or. Le méthylmercure est un polluant persistant qui s'accumule dans la chaîne alimentaire : chez les mammifères marins et certains poissons (par exemple le thon), il peut atteindre des concentrations 10 millions de fois plus élevées que dans l'eau. L'exposition au méthylmercure *in utero* est connue pour réduire les capacités motrices, les capacités d'attention, les capacités verbales et la mémoire.¹²⁷¹ Chez les enfants dès l'âge de 11 ans, il réduit le QI, la capacité de raisonnement, la mémoire et d'autres capacités cérébrales. Même chez les adultes, certaines fonctions cérébrales peuvent être gravement altérées par le mercure. Des concentrations élevées dans le sang endommagent le système cardiovasculaire. Aux États-Unis, jusqu'à 600.000 enfants naissent probablement chaque année avec des problèmes cognitifs dus à l'exposition de leur mère au mercure présent dans les produits de la pêche pendant la grossesse (ils représentent 3,2% de tous les cas de retard mental aux États-Unis).¹²⁷¹

L'utilisation massive d'engrais chimiques favorise le développement d'algues (eutrophisation) dans de nombreuses régions de la planète. Les dérivés du pétrole réduisent la photosynthèse, entraînant une diminution dangereuse de la quantité d'oxygène. L'absorption accrue de dioxyde de carbone dans l'atmosphère entraîne l'acidification des océans, l'extinction des récifs coralliens et la détérioration des coquillages.

Les événements accidentels tels que les déversements d'hydrocarbures en mer constituent un problème : on peut citer les accidents de 1974 au Chili (plus de 200.000 t), 1978 en France, 1979 au Mexique (plus de 500.000 t), 1989 en Alaska (37.000 t), 1991 dans le golfe Persique (1.100.000 t), 2010 au Texas aux États-Unis (508.000 t) et 2019 au Chili (40.000 L de diesel). Il s'agit de mélanges d'hydrocarbures avec des substances très dangereuses pour la santé des organismes aquatiques et des êtres humains.

Les mécanismes par lesquels la pollution chimique endommage les écosystèmes marins sont largement inconnus, mais les effets sont très clairs et alarmants : les réserves de poissons diminuent. Il est prévisible que les conditions artificielles créées par diverses altérations puissent favoriser des micro-organismes pathogènes pour l'homme, comme l'agent du choléra (*Vibrio cholerae*) et les toxines produites par certaines algues qui peuvent être ingérées par la consommation de crustacés (saxitoxine, acide domoïque produit par les diatomées) et de poissons (ciguatoxine produite par les dinoflagellés faisant partie du plancton).

La protection des océans doit être abordée à l'échelle mondiale et le plus rapidement possible. Les actions d'atténuation et de prévention sont très simples, certaines sont suggérées : ¹²⁷¹

- Ne pas utiliser le charbon comme source d'énergie.
- Ne pas utiliser de mercure.
- Ne pas utiliser de plastique et gérer les déchets de manière à réduire l'empoisonnement de l'eau de la planète.
- Ne pas utiliser de polluants persistants.
- Ne pas utiliser d'engrais chimiques.
- Réduire l'activité de pêche.
- Protéger la plupart des mers en créant des zones protégées.

Si l'on n'inverse pas cette tendance, la dégradation des océans et les risques qui en résultent pour notre santé et notre sécurité vont s'accroître.

LE DILEMME ENTRE LA CROISSANCE INFINIE ET LA DIMENSION NON MATÉRIELLE DE LA PROSPÉRITÉ

L'un des échecs évidents de l'humanité est de s'être appuyée sur des règles artificielles telles que les règles économiques et financières, qui ne sont pas durables. L'erreur énorme consiste à considérer l'économie comme indépendante de la nature. Le modèle de société actuel est inadéquat, non durable et plein d'incertitudes quant aux évolutions futures. Notre capacité de prévision est très incertaine : bien que les prédictions soient très inquiétantes, elles peuvent se révéler optimistes. D'une part, nous sommes vaniteux lorsque nous croyons pouvoir prédire les effets du changement que nous générons, et d'autre part, nous sommes irresponsables en ne mettant pas en œuvre les mesures préventives nécessaires. De nombreux changements tels que ceux générés dans la biodiversité, le climat ou la pollution peuvent nous surprendre, avec des mécanismes non linéaires mais, par exemple, avec des seuils et des effets rapides et imprévisibles. Une société prévoyante, en plus d'essayer d'inverser le processus de destruction des équilibres naturels, devrait mettre en place des stratégies pour renforcer la résilience aux changements destructeurs qui ne manqueront pas de se produire dans les années à venir. La richesse économique de la société humaine et la santé de la planète sont étroitement liées, tout comme la santé l'est à l'environnement. Probablement au moins un quart des maladies, et un tiers de celles qui touchent les enfants, sont influencées par des facteurs environnementaux que nous détériorons, et qui ne feront donc qu'augmenter. Nous devons insister sur ce concept : la dégradation de l'environnement précède la détérioration de l'état de santé (par exemple, l'augmentation des zoonoses et des cancers) et la détérioration de la sécurité sociale. La croissance démographique actuelle et l'augmentation encore plus rapide de l'exploitation des ressources limitées de la planète ne sont pas viables. Certaines limites planétaires ont été dépassées, de sorte que nous sommes entrés dans une zone d'incertitude et de risque élevé : le changement climatique, la destruction de la biodiversité, les flux biochimiques de phosphore et d'azote, le changement d'affectation des sols (déforestation, réduction de la fertilité, etc.) sont quelques-unes des pressions destructrices sur l'environnement que nous devons absolument réduire. D'autres aspects tels que l'acidification des océans, l'exploitation et la pollution de l'eau douce, la production de déchets, la pollution atmosphérique sont probablement aussi entrés dans une phase d'incertitude inacceptable. Les prévisions attendues et espérées par les économistes concernant la croissance de la richesse (du PIB ou produit intérieur brut), ne serait-ce que de quelques points de pourcentage chaque année, sont une véritable utopie. La planète que nous avons ne nous permet pas de le faire, et les résultats que nous obtiendrons certainement sont la déstabilisation de la sécurité sociale et la détérioration de la qualité de vie. Le PIB indique la valeur monétaire des biens destinés à la consommation finale, des investissements publics et

privés et des exportations nettes (exportations totales moins importations totales) échangés contre de l'argent au cours d'une période donnée. En 2015, le PIB mondial était évalué à 77.302 milliards de dollars et la dette mondiale représentait au moins 2,3 fois cette valeur (les deux tiers de la dette sont générés par des particuliers) ; en 2018, le PIB mondial était d'environ 91.000 milliards de dollars, soit 200 fois plus qu'en 1750.^{844, 979} En même temps, les indicateurs de l'existence de spéculations alarmantes qui devraient attirer notre attention sont ignorés :

- En 2008 (année de la grave crise économique), la valeur des produits financiers était au moins 14 fois supérieure au PIB mondial ;
- En 2011, 45 des 50 premières multinationales ne produisaient pas de biens, étaient des banques ou des compagnies d'assurance ;
- Sur les marchés financiers, pour 100 dollars échangés entre pays, seuls deux sont utilisés pour payer des biens et des services ;
- En 2012, entre 21.000 et 32.000 milliards de dollars étaient cachés dans des paradis fiscaux (les entreprises évitent de payer des impôts dans le pays où elles génèrent leurs bénéfices).⁹⁸⁰

Les incitations en faveur des combustibles fossiles constituent un fait alarmant : au moins six cents milliards de dollars par an. Le système financier est indifférent à la santé de la population et de la nature, même si les limites sont évidentes partout. Le marché ne se soucie pas des enfants et raisonne par quartiers.

Le PIB ne peut être considéré comme un outil approprié pour évaluer l'évolution du bien-être d'une société. Parmi les faiblesses de cet indicateur économique figurent l'absence de prise en compte du capital naturel, des dommages environnementaux, des déchets, des effets sur la santé, ainsi que l'omission d'autres aspects, apparemment moins compliqués, tels que le bénévolat, le chômage, le niveau culturel ou le travail domestique. Ces éléments, tels que la pollution, ne sont pas comptabilisés comme ils devraient l'être (les éléments négatifs comprennent la pollution et la destruction de la biodiversité). En tout cas, il est risqué de vouloir donner un prix à toutes les choses pour les marchandiser, comme la pollution, la santé humaine ou les pollinisateurs que nous exterminons. Identifier le bon prix ne nous permet pas de percevoir la véritable valeur immatérielle et nous fait croire que nous pouvons tout acheter, même la vie. Attribuer une valeur économique à toute chose est une approche peu intelligente et peu clairvoyante.

Le PIB peut augmenter si l'on vend des armes, si l'on mène des guerres, si la pollution augmente (il faudra la dépolluer), si l'on vend plus de cigarettes et de drogues, si l'on vend des arbres millénaires, si l'on construit des routes et des hôtels dans des paradis naturels, si l'on conçoit de nouveaux biens en utilisant la stratégie de l'obsolescence planifiée, si l'on vend plus de médicaments, si les maladies augmentent (plus d'argent est dépensé pour le diagnostic et le traitement) et si la production de déchets augmente. En même temps, le PIB par habitant diminue si la population croît plus vite que les économies. Les biens peuvent être achetés sous forme de marchandises, mais ils peuvent aussi être produits par soi-même pour ses propres besoins ou échangés (troc ou don). Dans ces derniers cas, ils n'influencent pas positivement le PIB. Dans la société industrielle, les biens ne sont pas produits pour satisfaire les besoins des acheteurs, mais pour gagner plus d'argent que ce qui est dépensé pour les produire.

Il faut rappeler que le PIB ne peut fournir une mesure des inégalités : au moins trois milliards de personnes vivent avec moins de 5 euros par jour. La croissance du PIB ne pourrait profiter qu'à ceux qui sont déjà riches, c'est-à-dire que l'augmentation pourrait ne pas affecter du tout la richesse économique de la majorité de l'humanité ou pourrait même l'aggraver, comme c'est le cas actuellement. Parmi les effets pervers de cette vision du capitalisme de consommation figure la génération d'énormes dettes qui sont léguées aux enfants (tout un cadeau).

Un indicateur du cercle suicidaire que représente le mythe de la croissance infinie est la publicité, qui dispose du deuxième plus gros budget au monde après l'industrie de l'armement.

⁸³⁶ La publicité est devenue un outil sophistiqué et systématique pour lobotomiser le cerveau et

persuader les gens de s'adonner au consumérisme effréné qui envahit nos vies de la naissance à la mort. Grâce à la publicité, il a été possible de créer une culture consistant à pouvoir tout posséder à crédit, avec des effets plus dévastateurs que ceux générés par les drogues. Parmi les mesures réclamées par les organisations supranationales (Banque centrale européenne, Union européenne, Fonds monétaire international) pour relancer la croissance économique dans les pays où le PIB diminue, il est utile d'en souligner quelques-unes afin de réfléchir à l'avenir que nous souhaitons : ⁸⁴⁴

- Réduction des dépenses pour les services sociaux : retraites, écoles, santé, soins.
- Augmentation de la charge de travail et réduction des salaires des fonctionnaires.
- Le report de l'âge de la retraite.
- Privatisation des services publics locaux : eau, déchets, transports, santé, éducation.
- Introduction de critères de gestion privée dans les services sociaux tels que les écoles et la santé.
- Vendre d'importants biens publics.
- Le gaspillage de ressources pour financer et soutenir des activités et des travaux inutiles aux conséquences inacceptables. L'idée du "too big to fail" (trop gros pour faire faillite) fait partie de cette vision : il s'agit d'un suicide collectif programmé au profit de quelques-uns (banques et grandes entreprises).
- Subventionner, directement ou indirectement, la consommation de ressources de manière inefficace, non durable et non démocratique, comme l'agriculture chimique, les agrocarburants et les combustibles fossiles.

Non seulement ces mesures n'augmentent pas le PIB, mais elles aggravent la crise et n'atténuent pas les problèmes environnementaux et sociaux qui devraient être traités différemment : le principal avantage est l'augmentation des flux d'argent du plus grand nombre vers une minorité. Le public (l'État) devrait décider des règles du privé (le marché) et non l'inverse. Les politiques dominantes distribuent les dettes et les échecs du secteur public et du secteur privé sur la classe moyenne, favorisent le chômage, l'exploitation et, par conséquent, la migration. La liberté et la démocratie sont affaiblies. L'utilisation du PIB comme référence pour mesurer le bien-être d'un État et pour planifier les politiques économiques devrait être définitivement abandonnée.

Malheureusement, l'économie est considérée comme n'ayant aucun lien avec l'environnement, commettant ainsi une grave erreur qui devrait être corrigée de plusieurs manières, notamment en modifiant les parcours éducatifs et culturels qui l'ont générée. Il y a probablement assez de ressources pour tout le monde, mais certainement pas assez pour la cupidité de chacun.

Continuer à utiliser des règles économiques artificielles pour gérer les sociétés, c'est faire preuve d'irresponsabilité. Nous compromettons la liberté et la sécurité, notamment des plus pauvres et de la prochaine génération. Ceux qui croient en la croissance infinie de l'économie mondiale font confiance à l'impossible, et sont donc aussi ignorants que les économistes qui professent cette foi, ou sont fous ou de mauvaise foi. La durabilité, et donc la réduction du consumérisme, n'exprime pas un désir nostalgique d'une vie en harmonie avec la nature, mais est le résultat d'une prise de conscience de la non-substituabilité des fonctions des écosystèmes. Il est donc important que les économistes qui prônent la croissance infinie comprennent l'importance de la biosphère, y compris pour les finances.

La croissance de l'économie mondiale aux niveaux actuels signifie un doublement tous les 20-25 ans : théoriquement, avant 2100, elle devrait devenir entre quinze et vingt fois plus importante qu'aujourd'hui. Une augmentation du PIB de 3,5% par an et par habitant (équivalente à celle enregistrée par la France entre 1949 et 1959) génère une augmentation de 31 fois en un siècle, 972 fois en deux siècles et 30.000 fois en trois siècles. Pour espérer y parvenir, il faut d'abord assurer la conquête de plusieurs autres planètes. Malheureusement, d'importantes institutions, telles que la Banque mondiale, prévoient la possibilité de maintenir ces taux de croissance afin d'assurer le bien-être de l'humanité : multiplier par quatre la richesse de la planète d'ici 2050. ⁸³⁶

Les limites d'une Planète finie ont été complètement ignorées et les capacités du Royaume des êtres vivants ont été considérées comme infinies. Pourtant, les signes évidents dans le monde entier devraient ébranler ces magiciens de la finance : le PIB se contracte inexorablement. Les tentatives de relance de la croissance se révèlent être le comportement irrationnel d'un malade en phase terminale en proie à la folie.

Le rythme de croissance actuel sera définitivement stoppé par la destruction de la biosphère et l'insécurité sociale : une crise se profile, préalable à la guerre.⁶⁸¹ En définitive, la récession sociale devient de plus en plus concrète et réelle. Une décroissance mélancolique se profile, menant à un effondrement soudain. Le mythe de la croissance économique comme remède aux problèmes du monde est assez inquiétant. C'est aussi un signal alarmant de croire que nous pouvons nous passer des problèmes environnementaux parce que la technologie va nous sauver.

⁸⁴⁶

À ce stade, nous devrions seulement nous demander laquelle des limites planétaires, si nous continuons à épouser la foi de la croissance, aura le premier et le plus grand impact sur l'effondrement de l'humanité. La crise de l'épuisement des ressources non renouvelables, l'incapacité d'absorber les polluants ou la réduction de la production alimentaire ? Les simulations de divers scénarios futurs aboutissent toujours à la même conclusion : l'effondrement de la sécurité sociale et de la biosphère avant la fin de ce siècle. Dans le pire des cas, entre 2030 et 2070.⁸³⁶

La combinaison de facteurs négatifs génère une pression psychologique considérable. Ainsi, tant chez ceux qui seront directement touchés par les catastrophes causées par les activités humaines que chez ceux qui seront heureusement moins affectés, on peut facilement s'attendre à une augmentation de phénomènes tels que l'anxiété et la dépression.

Malheureusement, certains pensent que l'humanité devrait accepter le désastre écologique que nous avons créé comme un dommage collatéral à un beau destin. C'est une vision qui implique un analphabétisme environnemental et qui est égocentrique, car nous nous promouvons au rang de dieux. Selon cette vision irréaliste, l'espèce humaine prend le contrôle de tout : les écosystèmes de la planète Terre et les flux de matière et d'énergie qui régulent la santé de la biosphère. La simple suggestion de cette ingéniosité et de ce pouvoir, jusqu'ici attribués uniquement à des forces surnaturelles, met en évidence notre myopie et notre cupidité. La biosphère, à travers un long processus d'évolution, a donné naissance au cerveau humain, qui à son tour a produit la culture. Ce dernier a réussi à produire une innovation technologique qui fait peur car elle est capable de détruire la biosphère. Nous devons donc nous demander si le cerveau humain, par le biais de la culture, sera capable de sauver la biosphère, c'est-à-dire de se défendre contre elle-même.

Le grand défi qui nous attend est de concevoir une nouvelle société qui consomme beaucoup moins, qui génère moins de pression négative sur l'environnement et qui, en même temps, est capable de garantir à tous l'eau, la nourriture, les soins de santé, l'éducation, la sécurité personnelle, la liberté d'expression, l'emploi, l'égalité, l'égalité des chances et la participation politique. La société du futur devra donc chercher à garantir les droits fondamentaux pour le bien-être collectif en utilisant beaucoup moins les ressources de la planète. Certains ont appelé cette transition (nécessaire) "décroissance heureuse" ou "révolution pacifique", probablement pour la distinguer de l'effondrement et de la récession ingérables qui nous attendent.⁸⁴⁴ La décroissance doit être un processus géré, planifié, contrôlé, partagé, progressif, avec des objectifs précis, tels que la réduction de la production de biens et l'encouragement de pratiques durables (réduction de l'utilisation des combustibles fossiles, augmentation de la fertilité des sols et de la biodiversité, etc.)

Parmi les actions proposées pour contrer les lois injustes, telles que celles favorisant les monopoles et les inégalités, figure la désobéissance civile :

- l'autoproduction de biens ;

- des échanges basés sur le don ou le troc (sans passage d'argent) ;
- ne pas utiliser de produits provenant d'entreprises qui ne peuvent pas garantir la transparence en matière de protection de l'environnement et de sécurité des travailleurs ;
- l'achat d'aliments produits localement, directement auprès des agriculteurs ;
- réduire la consommation de produits animaux ;
- ne pas utiliser d'eau en bouteille.

Le boycott des grandes marques qui adoptent des politiques opaques, voire destructrices, à l'égard des ressources humaines et naturelles devrait être une nouvelle forme d'expression de la liberté et de la responsabilité envers les générations futures. Parmi les innombrables exemples de protestation pacifique, il est intéressant de rappeler la distribution de graines de plantes (amarante sauvage en Amérique du Sud, qui est une plante comestible) devenues naturellement résistantes à l'herbicide glyphosate, afin de s'opposer aux projets de diffusion de plantes génétiquement modifiées tolérantes au même herbicide.⁹⁷⁵

L'ensemble de la biosphère est tellement interconnecté et influencé par les activités humaines que les solutions personnelles, locales et minoritaires ne peuvent constituer une solution, même s'il est vrai que l'action doit commencer quelque part. Cependant, des actions locales sont nécessaires pour organiser la résilience, c'est-à-dire pour amortir les coups qui arrivent.

Malheureusement, les règles économiques actuelles considèrent positivement les investissements dans les armes ou dans des travaux concrets inutiles et nuisibles. Les activités ou services qui ont des conséquences négatives pour la communauté peuvent augmenter certains indicateurs qui signalent une augmentation de la richesse. Paradoxalement, une augmentation de la maladie est également un indicateur positif si elle est liée à une augmentation des dépenses de traitement. Au contraire, les indicateurs de richesse devraient également prendre en compte des paramètres qui mesurent la qualité de la vie (bien-être social et santé) et de l'environnement, comme par exemple :

- l'espérance de vie ;
- le niveau moyen d'éducation et l'accès à des parcours éducatifs de qualité ; il convient de mesurer les compétences et le niveau d'éducation des élèves, plutôt que les ressources publiques consacrées aux écoles, surtout si les investissements monétaires ne sont pas suivis d'une évaluation précise des bénéfices correspondants ; l'éducation peut être considérée comme un contrat entre la société et l'avenir et il est de plus en plus nécessaire de l'actualiser pour ne pas répéter les erreurs du passé ;
- le salaire moyen et le salaire minimum ;
- des initiatives de lutte contre la pauvreté ;
- la possibilité d'accéder à un service de santé de qualité ;
- la santé de l'eau et du sol ;
- la qualité de l'air ;
- l'étendue et la qualité des espaces naturels (biodiversité) ;
- la disponibilité d'espaces verts à proximité des habitations ;
- l'indépendance vis-à-vis des sources d'énergie fossiles ;
- l'indépendance vis-à-vis des ressources extérieures au territoire (par exemple, la nourriture) ;
- la disponibilité du temps libre ;
- la possibilité d'accéder à des activités récréatives (par exemple, des sports) et culturelles (par exemple, de la musique) ;
- la présence et la prévention de la criminalité ;
- la disponibilité des transports publics et des alternatives aux voitures privées.

Les indicateurs mentionnés devraient être pris en compte par les règles économiques et financières, ce qui n'est pratiquement pas le cas. Malheureusement, même en Italie, les biens environnementaux sont souvent vendus et donnés en concession à des particuliers pour très peu

d'argent, même s'ils génèrent des milliards de revenus, comme les concessions pour les plages, les carrières, l'eau minérale ou l'autorisation de faire construire du béton. Des incitations exagérées sont accordées aux écoles publiques, aux dépenses d'armement, aux "fausses" énergies renouvelables (comme le méthane produit par le maïs) et aux établissements de santé privés. La réduction de ces dépenses pourrait permettre de dégager des ressources pour des activités et des services plus importants. En 2012, le PIB (produit intérieur brut) de l'Italie a diminué de 2,4% et, par conséquent, les dépenses sociales ont été réduites de moitié.⁸⁷⁵ Au moins une famille sur trois n'est pas en mesure de faire face à des dépenses imprévues de quelques centaines d'euros. Pendant ce temps, partout en Europe, les banques privées sont renflouées avec des fonds publics.

Cela nous rappelle une phrase formulée il y a longtemps, mais toujours valable, que nous pouvons réécrire : *autrefois, nous recherchions la sagesse, puis nous nous sommes contentés de la connaissance, maintenant il nous reste l'information, filtrée par des règles politiques et religieuses, régie par la logique économique, qui cultive l'ignorance de manière systématique et programmée*. Il existe de nombreuses études, menées par exemple par des sociologues, qui montrent que la probabilité de guerres civiles est nettement plus élevée dans les sociétés où les jeunes sont instruits et sans emploi. Les attentes non satisfaites peuvent être le déclencheur de conflits sociaux très dangereux. Certains pourraient peut-être considérer cela comme une raison valable pour cultiver l'ignorance.

ÉCOCIDE : L'ÉCONOMIE N'ACCEPTE AUCUNE LIMITE

La croissance économique et financière vénérée par le consumérisme ne peut être soutenue ; la croissance de la consommation dépasse celle de la population : de 1950 à 2012, la population a doublé mais l'économie mondiale a été multipliée par sept et la consommation annuelle d'énergie par cinq.³⁷ Malheureusement, le taux de consommation d'énergie augmente encore plus vite que la croissance démographique. Les règles économiques et financières ne tiennent pas compte du fait que la population, la production de biens et de nourriture, l'utilisation des ressources, la production de déchets et la pollution ne peuvent pas croître éternellement. Il existe des limites physiques aux sources de matière et d'énergie et à la capacité des réservoirs qui reçoivent les polluants et les déchets. En effet, de nombreux impacts, tels que ceux générés par la production de polluants, ont déjà dépassé la limite fixée par la capacité de dépollution naturelle. Le fait que la politique et la société ne tiennent absolument pas compte de ces limites devrait donner à réfléchir et susciter des inquiétudes. De nombreux polluants n'ont jamais existé dans la nature et leurs effets, souvent peu connus, sont négatifs. Le contrôle de la nature sauvage et son humanisation (consciente) détruisent de manière irréversible la biodiversité nécessaire au développement de notre espèce.

La dégradation continue de l'environnement permet de prévoir facilement que, pour la majorité des habitants de la planète, le niveau de base de la sécurité sociale ne sera pas assuré. Si des mesures ne sont pas prises avec des politiques appropriées, qui passent nécessairement par une diminution de la consommation et de l'utilisation des ressources naturelles, le risque d'effondrement existe. Une nouvelle vision est nécessaire pour éviter la barbarisation. À cet égard, il est utile de rappeler qu'en 3358 ans (de 1496 avant Jésus-Christ à 1861), il y a eu 3130 années de guerre et 277 de paix, soit treize années de guerre pour chaque année de paix. Un autre indicateur est également très alarmant : la durée moyenne des plus de 8.400 traités de paix conclus entre 1550 avant J.-C. et 1860 n'était que de deux ans.⁸⁴⁷

Si moins de 1% des au moins 14.000 armes nucléaires enregistrées dans les arsenaux de neuf pays (en 2018) étaient utilisées, nous assisterions à une déstabilisation implacable, comme la fin

de l'agriculture et de la civilisation partout (la folle stratégie de la destruction mutuelle assurée a jusqu'à présent permis d'éviter le pire).⁹⁸⁰

La décroissance doit être planifiée et conçue en soutenant la dimension non matérielle de la prospérité : famille, amitiés, sentiment d'appartenance, loisirs, identité, but de la vie et altruisme. Le consumérisme nous a accoutumés à l'idée que le bonheur réside dans la possession de biens, alors que nous devrions commencer à apprécier la liberté de la non-consommation. Le consumérisme cultive des pièges sociaux qui favorisent l'égoïsme, la solitude et la marchandisation de tous les aspects de la vie : le niveau de vie des riches se retourne contre l'avenir de nos enfants.

Pour être réaliste, une grande partie de la population mondiale vit actuellement dans de bien tristes conditions. La vérité est que, pour une grande partie de la population, un scénario d'augmentation des revenus et de sécurité sociale sur une planète de plus en plus surpeuplée et spoliée est un faux espoir. Un autre obstacle majeur est qu'il est très peu probable que les actions individuelles suffisent à provoquer un changement social généralisé, surtout dans un environnement social hostile au changement. Laisser le marché en plan ne peut pas non plus être la solution.

Nous assistons de plus en plus à un phénomène moralement discutable : des groupes de personnes riches et puissantes tentent de persuader d'autres groupes beaucoup plus importants (dépourvus de prestige et de pouvoir) de renoncer à leurs richesses matérielles ; le message subliminal est le suivant : armons-nous ensemble mais partez au front sans nous car nous ne renonçons à rien.^{841, 842} Ce type de communication médiatique, qui touche de larges pans de la population, est inefficace et privé du partage nécessaire, même s'il présente des aspects positifs. Le sens de l'initiative commune est démantelé et le sentiment d'urgence est diminué.

L'un des principes fondamentaux de l'économie écologique devrait inclure le concept selon lequel il existe des biens et des services naturels qui sont communs à toute l'humanité et nécessaires aux générations futures. Ces biens communs ne doivent pas être privatisés mais doivent être gérés selon des principes de préservation, de durabilité et d'équité. Le profit privé tend à socialiser les pertes et à transmettre les dettes (environnementales) aux générations futures. La prospérité doit être assurée pour tous et doit être découplée de la croissance économique. Le conte de fées de la croissance économique illimitée est devenu une arme fatale contre les défis écologiques, sociaux et financiers que nous devons tenter de résoudre au plus vite.

Les limites planétaires doivent être acceptées, c'est-à-dire que la liberté de détruire et de s'approprier les ressources naturelles doit être limitée. Il est essentiel de protéger, de maintenir et d'améliorer le capital écologique dont dépend également l'économie, qui apparemment s'en moque. Les limites sont ennuyeuses, elles sont évitées par les politiciens parce qu'elles les rendent impopulaires, mais elles sont efficaces. Pour minimiser et éviter de faire face à ces défis, qui sont une vérité dérangeante, certains pensent qu'il ne peut y avoir de limites insurmontables à la croissance économique, car il n'y a pas de limites à l'imagination et à la volonté de l'humanité. Cette vision est erronée et conduit l'humanité à s'étendre au-delà de la capacité de la planète. Il existe de nombreuses propositions qui n'ont aucune utilité pratique pour contrer le désastre écologique. Parmi elles, l'idée que la croissance économique peut être soutenue en réduisant les dommages environnementaux par unité de bien ou de service. L'efficacité énergétique peut générer des avantages, mais la réduction des dommages environnementaux par unité d'un bien ou d'un service ne génère aucun avantage environnemental. Malgré ces améliorations de l'efficacité, la consommation de ressources non renouvelables augmente.

Les règles économiques ont déjà poussé au-delà de l'espace de fonctionnement sûr pour le climat, la perte de biodiversité, la réduction de la fertilité des sols et d'autres facteurs indispensables au bien-être de l'humanité (manque d'eau et de nourriture) et de la planète. Une croissance économique continue (infinie) dans un système écologique fini est impossible : ce

concept devrait être enseigné dès la première année dans les départements d'économie des universités de toute la planète et dans toutes les écoles pour politiciens. Le système d'éducation et de formation se révèle de plus en plus obsolète, dépassé, inadapté et basé sur des modèles perdants : capitalisme, consumérisme, marché sans règles, concurrence, individualisme, injustice, inégalité, analphabétisme environnemental. Le modèle culturel dominant considère que le capital naturel est privatisable et dévaluable. Elle néglige le fait que la dette publique la plus importante et la plus effrayante est celle contractée avec la nature et non par des inventions culturelles telles que les banques et la finance. Malheureusement, nous n'avons pas le temps d'attendre une génération d'économistes et de politiciens probablement meilleure. En même temps, nous devons apprendre à ne pas nous laisser tromper par les économistes et les politiciens. Le temps presse ; le remède le plus efficace serait peut-être de fermer de nombreux cours d'économie dans les universités.

Certaines prévisions réalistes mais effrayantes indiquent qu'à l'avenir, nous pourrions espérer pouvoir vivre de manière durable si la population mondiale était réduite à moins de 2 milliards. En consacrant au moins 5.000 mètres carrés à la production de nourriture par l'agriculture intensive, et au moins 10.000 mètres carrés à la production d'énergie renouvelable, pour chaque habitant, on pourrait espérer pouvoir mener une vie durable et digne.⁹⁷ Ce n'est pas un objectif impossible, on peut essayer de l'atteindre, même si la réduction numérique peut nécessiter plus d'un siècle et de nombreux sacrifices.

Si la population continue à augmenter, et avec elle la consommation, la probabilité que le système ne s'effondre pas soudainement est presque nulle, car l'écosystème et l'économie deviendront très vulnérables. Un effondrement de l'équilibre qui régule les écosystèmes pourrait entraîner un déclin soudain et incontrôlable, tant du système industriel typique des pays les plus riches que du nombre d'habitants de la planète. Les conditions régissant l'économie et notre relation avec l'environnement doivent être modifiées au plus vite. Les études, les enquêtes et les estimations incontestablement fiables, même si elles utilisent le langage aride des chiffres, aboutissent toutes à la même conclusion : l'avenir sera certainement pire pour la majorité de la population, mais l'effondrement est probablement encore évitable. Il y a donc encore de l'espoir et cela vaut la peine d'essayer de changer l'avenir plus judicieusement.

UNITÉS DE MESURE

L'attention est attirée sur la signification de certaines unités de mesure et d'autres concepts qui seront utiles pour une meilleure compréhension dans les études ultérieures.

Le préfixe "k" se lit kilo et signifie 1.000 fois, tandis que le préfixe "M" se lit méga et signifie 1.000.000 fois plus grand que l'unité de mesure précédente (par exemple, 3 kcal ou kilocalories correspondent à 3.000 cal ou calories).

Le préfixe "G" se lit giga et signifie 1.000.000.000, c'est-à-dire un milliard de fois l'unité de mesure qui le suit. À titre d'exemple, 1 Gkg correspond à un milliard de kilogrammes ou à un million de tonnes (Mt).

Une calorie (cal) est la quantité d'énergie nécessaire pour faire passer la température d'un gramme d'eau distillée de 14,5°C à 15,5°C, à une pression d'une atmosphère (c'est-à-dire au niveau de la mer). Une kcal (correspond à 1.000 calories) est la quantité d'énergie nécessaire pour élever d'un degré la température d'un kilo d'eau.

La combustion d'un kilo de méthane apporte 14.000 kcal, d'un kilo de diesel 11.000 kcal, d'un kilo de charbon 7.000 kcal et d'un kilo de bois de chauffage moins de 4.000 kcal.¹⁸⁷

La quantité d'énergie quotidienne nécessaire pour maintenir la vie d'un être humain est d'environ 2.000 kcal, et c'est la même quantité d'énergie qui est nécessaire pour faire passer 23,5 litres d'eau distillée de 15°C à 100°C. Pour faire passer complètement 1 kg d'eau distillée de l'état

liquide à l'état de vapeur, il faut environ 540 kcal, soit un quart de l'énergie quotidienne nécessaire à un être humain (c'est ce qu'on appelle la *chaleur latente de vaporisation*).

Les deux tiers de la population mondiale ont un régime essentiellement végétarien et consomment environ 200 kg de produits céréaliers par an. Un tiers de la population mondiale, y compris les Italiens, consomme environ 360 kg de viande et de produits carnés par an, ce qui nécessite la production d'au moins 655 kg de céréales (et autres aliments pour animaux) servant à nourrir les animaux. Si nous supposons que chaque personne aux États-Unis consomme 920 kg de nourriture par an, cela signifie qu'environ 3.800 kcal par personne et par jour sont disponibles. Aux États-Unis, pour produire 1 kcal de nourriture, il faudrait investir, en moyenne, au moins 13 kcal, soit 13 fois plus que l'énergie obtenue.⁴²⁵

Une tep (tonne d'équivalent pétrole) correspond à l'énergie développée par la combustion d'une tonne de pétrole. Cette énergie est conventionnellement considérée comme étant de 10.000.000 kcal (équivalent à 41,868 GJ, correspondant à 11.627,907 kWh).

La combustion de 1 kg de pétrole peut produire 10.000 kcal (1,16 kWh) et celle de 1 kg de gaz naturel 8.000 kcal (0,93 kWh). A titre d'exemple, 10.000 tep correspondent à environ 12 millions de m³ de gaz naturel.

Globalement, la planète consomme au moins 8 milliards de tep par an. On estime que chaque habitant de l'Europe consomme en moyenne au moins 3 tep par an. L'Italie est l'un des pays européens où l'indice de mobilité motorisée (civile et commerciale) est le plus élevé, ce qui est permis par l'importation de la majeure partie de l'énergie fossile utilisée.

1 baril de pétrole équivaut à 158,99 L (environ 135 kg).

Un être humain peut, pendant une courte période, générer une puissance d'environ 800 W [équivalente à 336 cal/seconde (800 x 0,24 cal/seconde) nécessaire, par exemple, pour monter les escaliers en courant], mais pour une activité physique soutenue, il ne peut développer une puissance supérieure à 50 W (12 cal/seconde). Un appareil radio-CD d'une puissance de 50 W peut utiliser une énergie équivalente à celle produite par le travail d'un être humain. Une voiture de taille moyenne d'une puissance de 80 kW, roulant à vitesse de croisière, consomme la même quantité d'énergie que 1.600 personnes produisant 50 W de puissance. Un avion qui décolle effectue autant de travail que peuvent en faire les muscles de 1,6 million de personnes (entre 2013 et 2018, les émissions de combustibles fossiles dues à l'aviation ont augmenté de 6% par an, un rythme équivalent à la construction de cinquante nouvelles centrales électriques au charbon par an).^{6, 1276}

Il a été possible d'exploiter très efficacement l'énergie contenue dans les liaisons chimiques des carburants, à la place de la force musculaire. Pour produire des céréales sans l'aide de machines et de produits chimiques, un être humain peut gérer un hectare par an, avec un engagement d'environ 1.200 heures/ha par an (par exemple au Mexique pour la culture du maïs). Alors que le système agricole intensif, hautement mécanisé et consommateur d'énergie fossile, tel que le système de culture du maïs que l'on trouve aux États-Unis, peut ne nécessiter que 10 heures de travail humain par hectare et par an.⁴²⁵ Dans le système d'agriculture intensive, un seul travailleur peut facilement gérer 50 à 100 ha, mais l'énergie utilisée est supérieure à celle contenue dans les aliments produits.

Un cheval/heure (HPh) correspond à 642 kcal (0,746 kWh). 1 CV correspond à la capacité de travail maximale qu'un cheval peut supporter en travaillant 10 heures par jour. Par convention, on considère que la capacité de travail d'un être humain est égale à un dixième de celle d'un cheval. Ainsi, un homme travaillant 10 heures par jour peut produire une énergie équivalente à 1 HPh. Pour mieux comprendre, on peut aussi considérer qu'un cheval peut faire en une heure le travail que 10 hommes pourraient faire en même temps. N'oublions pas que les premiers chevaux ont probablement été domestiqués en Asie vers 3000 avant J.-C.⁴²⁵

Un gallon (3,79 L) d'essence peut produire l'énergie équivalente à celle produite par 3 semaines de travail d'un homme travaillant 40 heures par semaine (à 0,1 CV ou 0,075 kW).

ÉNERGIE

L'énergie, selon certaines lois fondamentales de la physique, ne peut pas être créée et ne peut pas être détruite. En outre, la transformation d'une forme en une autre implique toujours une perte (par exemple, en chaleur). Les premières ampoules électriques (inventées par Thomas Edison en 1879) étaient très inefficaces, puisqu'elles ne transformaient que 0,2% de l'énergie en lumière.

Il existe une direction possible pour le mouvement spontané de l'énergie : d'un corps chaud vers un corps plus froid ; spontanément, le contraire ne se produit jamais.

Les moteurs à combustion interne produisent de l'électricité avec un rendement compris entre 30 et 40%. Cela signifie que seulement 30 à 40% de l'énergie contenue dans le combustible utilisé est convertie en électricité, le reste étant principalement perdu sous forme de chaleur (en réalité, de l'énergie est également consommée pour la construction du moteur, l'extraction et le transport du combustible, la gestion des déchets, la construction des routes et de nombreuses autres activités à forte intensité énergétique, de sorte que le rendement énergétique réel est inférieur à 30%).

Pour produire de l'énergie, il faut une énergie qui puisse être transformée d'une forme à une autre : par exemple, la combustion de dérivés du pétrole ou de plantes utilise l'énergie chimique stockée dans les liaisons chimiques (entre les atomes de carbone et entre les atomes de carbone et d'hydrogène). Un déclencheur (la température) et un oxydant (l'oxygène) sont nécessaires pour libérer cette énergie. Lors de la combustion, la masse initiale se transforme principalement en vapeur d'eau et en dioxyde de carbone, et se retrouve dans l'atmosphère, augmentant le volume initial, dans le cas de l'essence, jusqu'à 2.000 fois.

Chaque fois que nous transformons une forme d'énergie en une autre, par exemple de l'énergie électrique en énergie mécanique (par exemple un mixeur), seule une fraction de l'énergie initiale peut être transformée en énergie utile (par exemple la rotation des pales). La majeure partie de l'énergie initiale est perdue sous forme de chaleur, qui est libérée dans l'environnement (constitue une perte d'énergie). L'énergie est perdue à chaque étape. Au sein de la chaîne alimentaire, un maximum de 10% de l'énergie chimique contenue dans les aliments passe d'un niveau à l'autre. Cela explique pourquoi une chaîne alimentaire peut difficilement franchir plus de 4 ou 5 étapes et pourquoi les carnivores, au sommet de la chaîne alimentaire, ont besoin de très grandes surfaces pour leur survie. Chaque carnivore a également besoin de plus de 100 proies potentielles pour survivre.

L'énergie ingérée avec les aliments (énergie chimique) est consommée par l'activité physique et mentale, ou accumulée dans le tissu adipeux (une partie est perdue sous forme de chaleur et dans les matières organiques excrétées dans les excréments).

Toutes les formes d'énergie peuvent être converties en chaleur, alors que l'inverse peut ne pas se produire. L'énergie peut être échangée, mais doit être soumise à certains principes de base. L'énergie d'un système isolé, c'est-à-dire qui n'échange ni matière ni énergie avec son environnement, est toujours la même. Il peut passer d'une forme à une autre, mais le montant total ne change pas.

Un autre principe fondamental enseigne que les systèmes naturels tendent vers le désordre, c'est-à-dire qu'il est facile de parvenir au désordre, alors que l'ordre exige du travail et du temps.

Le transport de l'énergie coûte également de l'énergie. L'extraction du pétrole de puits tels que ceux du Moyen-Orient coûte 5% de l'énergie contenue, et son transport par voie maritime peut coûter 1% de plus. ⁶ L'extraction du charbon peut coûter 20% de l'énergie contenue. Un problème relevé par les experts est que les nouveaux gisements de sources non renouvelables, comme le pétrole ou le charbon, nécessitent plus d'énergie pour être extraits. Ainsi, au fil du

temps, la consommation d'énergie pour obtenir de l'énergie non renouvelable est appelée à augmenter.

La méconnaissance de ces principes de base conduit certains journalistes et hommes politiques à prétendre qu'ils peuvent "désintégrer" les déchets dans un incinérateur, et les économistes à proposer des modèles sociaux qui impliquent une croissance infinie du PIB. Nous construisons des biens qui consomment d'énormes quantités d'énergie et cette tendance ne peut être maintenue longtemps. Par exemple, pour construire un ordinateur, il faut dépenser une quantité d'énergie équivalente à 250 kilos de pétrole. Cela signifie qu'un ordinateur, avant même d'être utilisé, aura consommé trois fois plus d'énergie que ce qu'il est susceptible de consommer au cours de sa vie. Ne pas recycler des biens tels que les ordinateurs revient à gaspiller l'énergie utilisée pour les produire, à gaspiller des molécules rares et précieuses (appelées terres rares) et à polluer l'environnement.

Le modèle de vie actuel des pays industrialisés comme l'Italie est basé sur le consumérisme, qui offre, au moins à une partie de la population, un bien-être non durable, puisqu'il est fondé sur la destruction de ressources limitées et l'exploitation des personnes. Il n'y a probablement jamais eu sur Terre une espèce ayant une telle soif d'énergie et, en même temps, une capacité aussi efficace d'accumuler des richesses, bien au-delà des possibilités de consommation. Nous assistons actuellement au phénomène selon lequel les classes les plus riches peuvent accumuler d'énormes ressources, qui ne sont certainement pas efficaces pour améliorer la qualité de vie, car elles sont disproportionnées. En 2017, les huit personnes les plus riches de la planète possédaient une richesse égale à celle de la moitié des personnes les plus pauvres du monde.⁹⁸⁰ Même en Italie, les trois personnes les plus riches possèdent plus de richesses qu'un tiers de la population. La vitesse à laquelle le fossé et les inégalités se creusent est alarmante.

Le modèle économique actuel est basé sur une croissance infinie et a donc de nombreuses implications négatives, notamment parce qu'il est impossible d'avoir une augmentation infinie, par exemple de 2 à 3% du PIB par an, comme l'espèrent de nombreux économistes ; en effet, l'écosystème de la Terre est basé sur des ressources finies et, dans de nombreux cas, facilement mesurables, de sorte que l'espoir même de parvenir à une croissance économique infinie manque de crédibilité.

La source d'énergie primaire est celle qui est présente dans la nature et qui, par conséquent, ne provient pas de la transformation d'une autre forme d'énergie. L'énergie primaire fait référence à la disponibilité offerte par les sources d'énergie primaires telles que le soleil, le vent, les marées ou le pétrole. L'énergie primaire est le contenu énergétique des combustibles utilisés. Plus de 80% de l'énergie primaire provient des combustibles fossiles, qui sont limités et non renouvelables. En Italie, la consommation annuelle moyenne d'énergie primaire par habitant était (il y a plus de 10 ans) d'environ 2,8 tep, de 7,4 tep aux États-Unis et de 9,4 tep au Canada ; la moyenne mondiale est de 1,8 tep par habitant et par an.⁶

En divisant l'offre mondiale d'énergie primaire (environ 11 Gtep) par 7 milliards de personnes, on obtient la quantité d'énergie consommée par un habitant de l'Europe occidentale dans les années 1960. Il s'ensuit que, du moins en théorie, l'approvisionnement actuel en énergie pourrait permettre à tous les habitants de la planète de mener un mode de vie plus que décent. Cependant, nous savons que certains pays du monde consomment des quantités bien plus importantes : un Européen, par exemple, peut consommer plus de trois fois la moyenne mondiale disponible.

La source d'énergie primaire n'est pas immédiatement disponible car elle doit être transformée avant de pouvoir être utilisée : le pétrole est transformé en essence ou l'énergie solaire est transformée en électricité par des panneaux photovoltaïques. Lorsque la transformation a eu lieu, on parle d'énergie secondaire. Même le biogaz (méthane produit par la fermentation du maïs) doit être débarrassé de son humidité et de son soufre, puis enrichi en méthane, avant d'être envoyé à la combustion.

Si l'énergie mise à disposition par la source primaire n'est pas seulement transformée, mais aussi transportée jusqu'à l'utilisateur, elle est appelée énergie finale. Le processus de production et d'utilisation n'est pas idéal, et des pertes se produisent de sorte que l'énergie mise à la disposition du système concerné est inférieure à l'énergie finale. Cette dernière énergie est appelée énergie utile et peut représenter moins de 10% de l'énergie produite. Pour obtenir de l'énergie utilisable (par exemple de l'électricité), une grande partie de l'énergie primaire (même 2/3) peut être perdue, principalement sous forme de chaleur.

En moyenne, un citoyen européen consomme 50% de l'énergie pour maintenir constante la température de son lieu de vie et un autre tiers pour se déplacer en voiture. 65% de la chaleur et 50% de l'électricité sont produits avec du gaz naturel, tandis que 97% des transports utilisent des dérivés du pétrole. Il suffirait donc de quelques mesures simples, comme celles qui concernent le transport des marchandises et des personnes, pour réduire les déchets.

Une formule très célèbre est celle proposée par Einstein : $E = mc^2$. La masse (m) peut être transformée en énergie et, théoriquement, la quantité pouvant être obtenue est gigantesque, car la constante "c" est égale à la vitesse de la lumière (300.000 km par seconde). Ainsi, des masses minuscules suffiraient à obtenir d'énormes quantités d'énergie, s'il était simple de les libérer des atomes de manière contrôlée.

La fission nucléaire de l'uranium (l'atome est divisé en plus de 100 isotopes plus légers, dont certains sont radioactifs, comme le césium, l'iode et le strontium), qui a lieu dans les centrales nucléaires, libère d'énormes quantités d'énergie. La fission d'un gramme d'uranium (^{235}U) peut libérer la quantité d'énergie obtenue en brûlant 20 quintaux de pétrole.

Il serait bon de garder à l'esprit que l'utilisation de l'énergie nucléaire produit également des gaz qui altèrent le climat, contrairement à ce qui est souvent annoncé : construire et démanteler les centrales, extraire l'uranium (en Italie, il faudrait l'importer) et gérer les déchets qui seront encore mortels dans des milliers d'années.

LES EXTERNALITÉS CACHÉES DU CAPITALISME VERT

Les énergies dites renouvelables, telles que l'énergie solaire et l'énergie éolienne, constituent une alternative aux combustibles fossiles. Ces deux formes de production d'énergie sont en plein essor et contribuent certainement au dialogue sur les limites planétaires et la nécessaire conversion écologique. La transition énergétique, tout comme la transition numérique (internet, ordinateurs, téléphones, écrans, batteries), a sous-estimé les coûts et les impacts ; certains d'entre eux sont résumés ci-dessous :

- Les énergies renouvelables ont besoin des énergies fossiles pour être produites, les premières sont donc fortement dépendantes des secondes. Le rapport entre l'énergie investie et l'énergie obtenue est crucial. Les estimations de l'énergie fossile nécessaire pour obtenir une énergie qualifiée de "verte" et donc durable sous-estiment certains coûts tels que ceux de l'extraction et du traitement de tous les composants nécessaires à la construction. Sont également sous-estimés les coûts énergétiques liés au transport, à l'élimination et à la construction de tous les réseaux technologiques et numériques nécessaires au fonctionnement, tels que les batteries et les composants électroniques. Les usines et la numérisation ont également des coûts énergétiques importants. Il s'agit là d'une face cachée de la transition énergétique, alors que tout devrait dépendre de ces mesures, qu'une société tournée vers l'avenir devrait prendre comme premier bilan.

- Les technologies telles que les panneaux solaires nécessitent l'utilisation d'éléments qui sont présents dans la croûte terrestre en très faibles concentrations et

chimiquement liés à des substances dont il est coûteux et polluant de les séparer. Le problème est qu'ils sont présents en très faible concentration : moins de 1% du poids total des roches excavées. Par exemple, il faut extraire du sol près de 9 tonnes de roche pour obtenir un kilogramme de vanadium, 50 tonnes pour obtenir un kilogramme de gallium, 140 tonnes pour obtenir un kilogramme de platine, et deux cents tonnes pour espérer purifier un kilogramme de lutécium.¹⁰⁹² Il s'agit en fait de moins de 40 éléments et composés majeurs que l'on trouve dans le sous-sol et qui possèdent des propriétés physiques et chimiques particulières, ainsi que des propriétés magnétiques et optiques uniques. Par exemple, un téléphone portable nécessite au moins 50 minéraux et métaux différents pour être fabriqué.¹¹⁰⁰ Pour être purifiés, ils doivent être séparés chimiquement et physiquement d'autres substances plus abondantes et, dans certains cas, toxiques pour l'environnement (par exemple, les métaux radioactifs). Il faut donc dépenser beaucoup d'énergie pour les extraire, les séparer et les traiter afin d'obtenir les alliages souhaités. Les coûts énergétiques et les impacts environnementaux de ces opérations sont considérables. De plus, comme toutes les ressources de la planète, ces substances ne sont pas présentes en quantités infinies. C'est précisément en raison de ces facteurs que les terres rares sont extraites en petites quantités (dans certains cas, des centaines de tonnes tout au plus, à comparer aux millions de tonnes de cuivre ou aux milliards de tonnes de fer extraits chaque année sur la planète). Une autre conséquence est qu'ils sont chers (des milliers de fois plus que le fer).

- La production d'énergie renouvelable génère des impacts environnementaux peu connus qui peuvent occulter la durabilité de certains choix. L'extraction et le traitement des minéraux est l'une des industries les plus polluantes au monde, juste derrière le recyclage des batteries au plomb usagées.¹⁰⁹³ Les problèmes générés par l'ensemble du cycle de vie de l'extraction et du traitement des terres rares pour soutenir les technologies vertes sont divers. L'empreinte hydrique, c'est-à-dire la quantité d'eau nécessaire à l'extraction et au traitement, peut être énorme : même plus de 300 mètres cubes d'eau pour chaque mètre cube de roche. L'eau utilisée est retournée contaminée par des substances toxiques et, dans certains cas, des déchets radioactifs sont produits. La dégradation de l'eau (nappes phréatiques, rivières) peut être considérée comme irréversible ; il existe des dommages considérables pour la santé qui ne sont pas pris en compte dans les évaluations de la durabilité.

Afin d'extraire et de purifier les produits chimiques souhaités, il est nécessaire d'effectuer des traitements et des réactions chimiques en utilisant des substances dangereuses (par exemple, des acides sulfuriques et chlorhydriques) qui sont rejetées dans l'environnement. En outre, des substances et sous-produits dangereux et toxiques sont produits, tels que certains composés radioactifs (par exemple, le thorium et l'uranium radioactifs provenant de l'extraction souterraine et du traitement pour purifier les terres rares). Les mines et les lieux où sont gérés ces déchets toxiques resteront donc empoisonnés et potentiellement mortels pour des générations. L'extraction et le traitement de ces composés polluent l'eau, l'air et le sol. Les résidents et les travailleurs sont les plus touchés.¹⁰⁹² La pollution générée par cette industrie reste cachée ou n'est pas rendue publique, pour des raisons évidentes.

- L'empreinte carbone, c'est-à-dire la production de gaz altérant le climat (en termes d'équivalents de dioxyde de carbone) tout au long du cycle de vie des produits et des structures nécessaires à leur fonctionnement, n'est pas évaluée de manière adéquate. Les hauts fourneaux sont utilisés pour traiter les roches extraites, ce qui génère des émissions considérables et produit des déchets solides et liquides très dangereux. Il est probable qu'au moins 7% de l'énergie consommée dans le monde soit utilisée pour extraire les terres rares.¹¹⁰³ Les besoins en énergie fossile pourraient augmenter considérablement à l'avenir pour plusieurs raisons : les mines d'où les terres rares sont le plus facilement extraites s'épuisent et la demande de minéraux augmente régulièrement (3 à 5% par an).

Nous devrions penser aux activités minières, c'est-à-dire aux endroits où des substances sont extraites du sol, qui utilisent d'énormes quantités d'énergie, de substances dangereuses (par exemple, des acides) et d'eau, et génèrent une énorme quantité de déchets et de substances toxiques. Il est probablement impossible de penser à une exploitation minière durable, et encore plus impossible si la santé et la sécurité sociale des travailleurs, des résidents et des générations futures ne sont pas négligées.

Le nouveau modèle proposé par le capitalisme vert, basé sur la numérisation, la production d'électricité à partir de sources classées comme renouvelables et l'encouragement du transport électrique privé, tend à éloigner la pollution des yeux de l'élite et à la diriger vers les parties les plus pauvres de la planète. Cette distanciation de la réalité facilite l'illusion d'avoir amélioré la situation. De nouveaux impacts sont générés et s'ajoutent aux impacts existants, qui sont déplacés vers les lieux d'extraction et de traitement des terres rares et de production des technologies nécessaires à la transition prévue.

▪ Une promesse qui a été déçue est la possibilité de recycler ces composants qui coûtent cher et entraînent une dégradation de l'environnement. Malheureusement, le niveau de réutilisation, de récupération et de recyclage des panneaux solaires, des batteries et des composants électroniques est très faible. En outre, les folles règles du marché poussent souvent encore plus vite à l'autodestruction : l'obsolescence programmée des téléphones, des portables, des appareils ménagers, des voitures, etc.

En ce qui concerne les déchets électroniques, les plus grands producteurs sont la Chine, les États-Unis et l'Inde, qui produisent 38% du total mondial, mais l'Europe a la production la plus élevée par habitant. On estime que 53,6 millions de tonnes de déchets électroniques ont été produites en 2019, soit une augmentation de 21% par rapport à 2018 : seuls 17,4% ont été recyclés.¹⁰⁹⁵ Les Européens du Nord ont produit le plus de déchets électroniques en 2019, environ 22,4 kg par habitant (seule une petite fraction est constituée de terres rares, mais ce sont des miettes indispensables car irremplaçables).

Moins d'un sixième des déchets électroniques est correctement recyclé, ce qui entraîne un énorme gaspillage : les articles contenant des métaux précieux tels que le fer, le cuivre et l'or finissent dans les décharges. 300 tonnes d'or, soit l'équivalent de 11% de la production mondiale d'or, ont fini à la poubelle.¹⁰⁹⁶ L'absence de recyclage met l'environnement en danger : des millions de tonnes de matières dangereuses, dont le plomb, le mercure, le cadmium et le chrome, sont déversées dans les décharges. Si ces matériaux avaient été recyclés, ils auraient généré des milliards de richesses. Nos ordinateurs et nos téléphones portables contiennent probablement une quantité de métaux rares qui assurerait l'autosuffisance pendant de nombreuses années s'ils pouvaient être réutilisés. Le recyclage coûte beaucoup d'énergie, nécessite un traitement coûteux et polluant, et n'est pas intéressant d'un point de vue commercial. Il est beaucoup moins coûteux d'extraire de nouveaux métaux. En outre, le recyclage n'est pas toujours techniquement possible, car il implique la séparation de certains métaux d'alliages complexes. C'est comme espérer recycler certains des ingrédients utilisés dans la production alimentaire : théoriquement, il est possible d'imaginer des procédés d'extraction chimique, mais ils ne sont pas durables dans la réalité car ils coûtent trop cher et polluent beaucoup. Pour cette raison, le taux de recyclage de la plupart des métaux rares est inférieur à 10% ou 3%.¹⁰⁹⁷ Cependant, même si le recyclage fonctionnait, il ne serait pas suffisant aux taux actuels de croissance de la consommation : bien que le taux actuel de recyclage du plomb en Amérique du Nord et en Europe soit de près de 99%, l'extraction augmente.¹⁰⁹⁸

La gestion des déchets génère des problèmes environnementaux et le commerce illégal les exacerbe. Un principe de responsabilité environnementale adopté par la plupart des pays du monde est que les déchets doivent être éliminés à l'endroit (état) où ils ont été produits (c'est la théorie). La gestion technologique des déchets n'est pas non plus durable. La transition

énergétique requiert des technologies qui nécessitent l'extraction de terres rares du sous-sol. D'ici quelques années, les ordinateurs, téléphones et autres produits dotés de composants électroniques qui ont vu le jour dans un trou sont destinés à finir dans un autre. Au cours de ce passage de la mine à la décharge, qui peut prendre quelques années (obsolescence planifiée), de la pollution est générée, des ressources limitées sont consommées, des sites sont créés qui resteront toxiques pendant longtemps, et de nombreuses personnes sont exploitées et rendues malades. La pollution et l'exploitation des travailleurs sont délocalisées, de sorte qu'elles deviennent temporairement moins visibles, par exemple dans les grands centres urbains.

▪ L'extraction du sol de certains composés chimiques nécessaires à la transition vers les énergies renouvelables entraîne des impacts sociaux considérés comme inacceptables dans une société civilisée. Les travailleurs des mines, souvent situées dans des pays où les garanties sociales sont quasi inexistantes, sont sous-payés et exploités (par exemple, le cobalt extrait en République démocratique du Congo ; le tantale au Mozambique et au Rwanda ; le gadolinium et le niobium au Brésil ; le gallium, l'indium, le germanium et l'antimoine en Chine ; le platine, l'iridium, le ruthénium et le rhodium en Afrique du Sud ; le chrome au Kazakhstan).¹⁰⁹² Les dommages causés à la santé des travailleurs et de la population résidente ne sont pas pris en compte dans les estimations de la durabilité de ces processus.

▪ Comme de nombreux autres secteurs, celui des énergies renouvelables est également exposé au risque de spéculation et d'incitations excessives. Le prix de l'électricité produite par des panneaux solaires ou des éoliennes peut être beaucoup plus élevé que le prix du marché, ce qui fausse et masque les coûts réels. Les choix non durables peuvent affecter plusieurs aspects tels que l'installation de panneaux photovoltaïques sur le sol. L'accaparement des terres accroît les incidences environnementales et les externalités négatives telles que la réduction de la disponibilité des aliments, l'augmentation des prix des terres agricoles, la réduction de la biodiversité et de la fertilité.

▪ La répartition des endroits de la planète où sont extraites certaines de ces substances nécessaires à la fabrication des batteries et des panneaux solaires laisse entrevoir des problèmes géopolitiques. Certaines substances sont extraites de très peu d'endroits, il y a donc une sorte d'oligopole ou même de monopole. C'est très inquiétant car il s'agit d'une autre limitation. Pour donner un exemple, la Chine est probablement le premier producteur mondial de 28 terres rares (dans plus de dix mille mines).^{1092, 1099} La Chine a produit les superordinateurs les plus puissants du monde, est devenue le premier producteur de panneaux photovoltaïques, réalise les plus gros investissements dans l'énergie éolienne, produit la plupart des batteries nécessaires aux véhicules électriques et promeut plus de 100 projets de villes durables.^{1101, 1102} Elle mène donc la course vers la transition verte, mais elle est aussi le plus grand pollueur de la planète, suivie par les États-Unis.

En réalité, les terres rares ne sont pas concentrées dans les pays d'extraction les plus actifs. Il est probable que cette délocalisation vers les pays plus pauvres a été intentionnelle afin de déplacer les emplois les plus polluants et les plus dangereux pour la santé humaine à l'abri des regards ; un exemple est l'activité minière française qui, dans les années 1980, a purifié au moins 50% de certaines terres rares du monde, pour être ensuite presque démantelée et délocalisée en Asie : de toute façon, des déchets très dangereux comme les déchets radioactifs restent en France.¹⁰⁹² En outre, la délocalisation vers des pays où les garanties en matière de sécurité sociale et environnementale sont inférieures à ce qu'une société civilisée et prévoyante pourrait tolérer, permet aux entrepreneurs d'obtenir les mêmes choses à des coûts bien moindres. L'histoire se

répète également dans le secteur minier : les pays riches transfèrent les activités les plus polluantes et les plus dangereuses vers des pays pauvres qui étaient auparavant moins pollués.

Tous les trois ans, la Commission européenne révisé la liste des matières premières critiques pour l'Union européenne (UE). L'importance économique et le risque d'approvisionnement sont les deux principaux paramètres utilisés pour déterminer la criticité pour l'UE. L'importance économique analyse en détail l'affectation des matières premières aux utilisations finales en fonction des applications industrielles. Le risque d'approvisionnement prend en compte différents aspects tels que la dépendance de l'UE vis-à-vis des importations et les restrictions commerciales dans les pays tiers.¹⁰⁹⁹ La liste établie par la Commission européenne en 2020 contient 30 matières premières, dont 14 étaient présentes dans le rapport de 2011. Voici quelques-uns de ces matériaux : antimoine, cobalt, indium, phosphore, gallium, germanium, lithium, magnésium, niobium, tantale, tungstène et vanadium. L'approvisionnement de nombreuses matières premières essentielles est très concentré. Par exemple, la Chine fournit 98% des terres rares à l'UE, la Turquie fournit 98% du borate à l'UE et l'Afrique du Sud satisfait 71% des besoins en platine.¹⁰⁹⁹ Pour la plupart des métaux, l'UE est dépendante des importations à hauteur de 75 à 100%. Nous sommes donc complètement dépendants des autres, une condition très précaire et effrayante, surtout en temps de crise. Les pays importateurs peuvent fixer des limites aux exportations et décider des prix parce qu'ils ont un monopole. En fait, des centaines de restrictions à l'exportation sont enregistrées dans le monde ; il s'agit d'interdictions, de taxations, de quotas maximums pour certains pays plutôt que d'autres.¹¹⁰⁰ D'autre part, il est compréhensible que les pays pauvres et émergents exercent leur souveraineté sur les ressources qu'ils extraient et ne veulent pas les brader (en espérant que seuls quelques entrepreneurs n'en profitent pas). De nombreux pays refusent de gérer leurs ressources de manière transparente. En conséquence, le marché des terres rares pourrait s'avérer beaucoup plus instable, imprévisible et finalement plus en crise qu'on ne pourrait le penser.

Une autre piste de réflexion est le besoin de nombreux minéraux rares pour construire des armements (avions, missiles, navires) et les équipements connexes tels que les radars, les sonars, les équipements de vision nocturne, les lasers, les drones, les robots, les satellites et les systèmes de communication. L'industrie de la guerre a besoin de grandes quantités de ressources rares et précieuses, les États-Unis étant en tête.

Enfin, l'attention est attirée sur le fait que certaines estimations indiquent qu'un tiers du commerce des terres rares est assuré par le marché noir.¹⁰⁹²

À cette dépendance s'ajoute un autre problème : les prévisions d'augmentation de la consommation sont stupéfiantes. Pour soutenir la transition énergétique verte et la transition numérique, les prévisions pour 2050 et publiées en 2020 défient les limites de la planète : pour les batteries des véhicules électriques et le stockage de l'énergie, l'Union européenne aurait besoin de 60 fois plus de lithium et de 15 fois plus de cobalt que ce que toute son économie fournit actuellement. La demande de terres rares utilisées dans les aimants permanents, par exemple pour les véhicules électriques, les technologies numériques ou les éoliennes, pourrait être multipliée par dix d'ici 2050.

Au niveau mondial, la Banque mondiale prévoit que la demande de métaux et de minéraux va augmenter rapidement. L'exemple le plus significatif est celui des accumulateurs électriques, pour lesquels la demande de métaux pertinents tels que l'aluminium, le cobalt, le fer, le plomb, le lithium, le manganèse et le nickel serait multipliée par plus de 10 d'ici 2050 (dans un scénario d'augmentation de la température de 2°C). Il est probable qu'au moins une nouvelle mine par an devra être ouverte au niveau mondial pour soutenir la croissance prévue de la consommation de terres rares dans les années à venir. Les impacts environnementaux, les contraintes planétaires et les coûts générés par ces objectifs d'augmentation de la consommation arrêteront sûrement cette course bien plus tôt que prévu. Il est incroyable que la pollution, l'épuisement des ressources et

d'autres limites ne soient pas couverts par ces rapports officiels d'organismes accrédités. Le mythe de la croissance infinie devient une malédiction pour la santé et le bien-être de tous, en particulier des générations futures. Il existe une solution : réduire l'utilisation des ressources et n'appliquer que des processus qui garantissent une récupération et un recyclage complets ; une utopie ? Même si les ressources sont utilisées dans des processus circulaires, le processus n'est en aucun cas durable, mais il est tout de même plus durable. Il convient de rappeler qu'en Europe, le taux de recyclage des ressources rares et précieuses telles que le niobium, l'indium, le lithium, le tantale, le gallium, le phosphore (et d'autres) est nul, et pour d'autres comme le germanium et le vanadium, il est inférieur à 2%.¹⁰⁹⁹ La perspective d'installer de nombreuses nouvelles mines en Europe (et dans le monde entier) dans l'espoir de devenir autosuffisants et d'obtenir des taux de croissance irréalistes est une démonstration d'omnipotence potentiellement mortelle et autodestructrice, étayée par l'analphabétisme environnemental. L'accoutumance aux contes de fées et aux légendes encouragera le gaspillage de ressources publiques et de temps précieux.

Peut-être la construction de nouvelles mines dans les pays industrialisés d'Europe contribuera-t-elle à réduire l'ignorance des impacts de cette industrie et à appliquer des mesures plus protectrices pour les travailleurs et l'environnement que celles adoptées dans les pays pauvres. Vivre à proximité de mines, ou pire, devoir y travailler, contribuera certainement à sensibiliser et à vaincre l'indifférence. Peut-être que le fait de vivre à proximité de sites qui génèrent de nombreux problèmes environnementaux et sanitaires aidera à accepter certaines limites au consumérisme débridé.

Les conflits d'intérêts (et l'égoïsme) ainsi que le manque de connaissances sur les différents aspects à évaluer pour effectuer des comparaisons objectives et des choix durables ne permettent pas de prendre des décisions rationnelles et informées. Il faut davantage de certitudes avant d'investir dans des transitions considérées comme plus respectueuses de l'environnement. Le manque de transparence de l'ensemble de la chaîne qui devrait soutenir la conversion de l'énergie entretient l'illusion qu'elle est démocratique et universelle, la solution ultime à de nombreux problèmes. Les coûts réels et les externalités négatives devraient être évalués plus soigneusement afin d'éviter les dispositifs de marché qui reportent les inconvénients sur quelqu'un d'autre, de manière invisible pour la majorité des bénéficiaires potentiels. La production de panneaux solaires, de batteries, de numérisation et de technologies vertes (internet, ordinateurs, téléphones, voitures et vélos électriques) implique des impacts et des coûts qui sont sous-estimés ou délibérément tenus secrets.

Le capitalisme vert envisage un monde meilleur grâce à des technologies permettant d'économiser l'énergie et de réduire l'impact environnemental (décarbonisation). Cependant, le capitalisme vert épouse la théorie insensée de la croissance infinie ; par conséquent, l'extraction des terres rares au rythme actuel de l'augmentation des énergies renouvelables, de la numérisation et des technologies considérées comme durables (par exemple, les voitures électriques) devrait doubler au moins tous les 15 ans. Pour espérer maintenir le rythme de croissance de la transition énergétique, technologique et numérique en moins de 30 ans, nous devons probablement extraire plus de substances du sol que nous ne l'avons fait dans toute notre histoire. La réalité risque de décevoir ce rêve. Même un quart du poids d'une voiture électrique peut être généré par des batteries, et la quantité d'énergie nécessaire pour construire une voiture électrique est beaucoup plus élevée que celle nécessaire pour construire une voiture conventionnelle (jusqu'à 4 fois).¹⁰⁹² Les batteries sont composées au minimum de lithium, de nickel, de cobalt, d'aluminium, de manganèse, de cuivre, d'acier, de graphite et de plastique. Nous ajoutons à un type de rareté (celle du pétrole) celle des ressources naturelles précieuses et rares (les terres rares). Le bilan énergétique de l'ensemble du cycle de vie des voitures électriques, lorsqu'il sera révélé, sera très probablement une mauvaise nouvelle : les avantages en termes d'économies d'énergie et d'émissions de gaz altérant le climat sont insignifiants, voire

inexistants.¹⁰⁹² En outre, il ne faut pas oublier qu'actuellement, dans des pays comme l'Italie, la Chine, les États-Unis, l'Inde, la majeure partie de l'électricité est produite à partir de combustibles fossiles : méthane, charbon et dérivés du pétrole. La voiture électrique brûle donc aussi des combustibles fossiles en grande quantité. Le manque de transparence des informations qui devraient être à la base de tout projet ou investissement conduit à soupçonner que trop de personnes veulent nous faire croire que les choses vont s'améliorer, alors qu'il est bien plus probable qu'elles vont empirer. Même la production de tout ce qui est nécessaire à la technologie numérique, comme les téléphones, les ordinateurs et internet, consomme de grandes quantités d'énergie. La production d'ordinateurs et de téléphones portables consomme à elle seule au moins un cinquième des terres rares extraites chaque année. Un courriel *gmail* peut voyager à la vitesse de l'éclair depuis les États-Unis (où il est traité et stocké dans des centres informatiques énergivores) avant d'atteindre son destinataire. Il parcourt des milliers de kilomètres et tout cela coûte de l'argent, tant en termes d'installations et de réseaux qu'en termes d'énergie : un e-mail avec une pièce jointe nécessite l'énergie nécessaire pour maintenir une ampoule allumée pendant une heure.¹⁰⁹⁴ À l'échelle de la planète, plus de 10 milliards de courriers électroniques sont envoyés chaque heure, ce qui nécessite une énorme quantité d'énergie : plus de 50 GW/heure, soit l'énergie que peuvent produire des dizaines de centrales électriques au charbon ; le fonctionnement et le refroidissement d'un centre de transit et de traitement des données peuvent nécessiter l'électricité nécessaire pour répondre aux besoins de plus de 25.000 habitants. Les centres de traitement des données sont appelés centres de données (il y en a au moins 18 à Milan, et environ 50 dans toute l'Italie). Probablement tous les centres de données du monde ont besoin d'au moins 1% de toute l'énergie consommée sur la planète pour fonctionner : entre 2010 et 2018, l'énergie consommée par les centres de données a augmenté d'au moins 6%.^{1104, 1107} Les équipements électroniques consomment au moins 5% de l'énergie mondiale.¹¹⁰⁵ Un centre de données peut absorber 50 mégawatts, ce qui est suffisant pour faire fonctionner 140.000 téléviseurs. Un centre de données fonctionnant à 4 mégawatts peut occuper une surface de 5.000 mètres carrés et consommer 8 tonnes de pétrole par jour (l'équivalent d'environ 57 barils de 140 kg chacun par jour ; 30% de l'énergie peut être nécessaire pour le refroidissement).¹¹¹⁰ Dans les années à venir, cette consommation devrait augmenter de façon spectaculaire : d'ici 2030, la consommation d'électricité dans les centres de données devrait être multipliée par dix, pour atteindre 8% de la demande mondiale.^{1106, 1108, 1109} Il est possible que d'ici 2025, au niveau mondial, le nombre d'utilisateurs d'internet ait augmenté de 1,1 milliard, que la consommation d'énergie résultant de l'utilisation des services de réseau soit multipliée par 2,9, la consommation d'électricité par 2,7 et les émissions de gaz à effet de serre par 3,1.¹¹¹¹ Ces chiffres sont sous-estimés car ils n'incluent pas de nombreux autres coûts énergétiques tels que ceux générés par la construction des structures, des équipements et leur élimination (penser aux câbles qui traversent la planète). Ainsi, même la transition numérique nécessite des investissements considérables et l'idée de dématérialiser l'information et la communication est une grande tromperie. Nous devons réfléchir à la question suivante : un monde connecté et numérique est-il préférable à un monde propre ? Nous ne pouvons plus ignorer ou continuer à nous laisser bernier par la perspective d'une croissance infinie ou de technologies numériques présentées comme durables. En conclusion, le capitalisme vert, avec la transition énergétique et numérique qu'il soutient, exacerbe la pression humaine sur les écosystèmes en ajoutant d'autres problèmes, comme ceux générés par l'extraction et le traitement des terres rares, et par la demande accrue de consommation d'électricité qui n'est ni aussi durable ni aussi renouvelable qu'on le prétend. Nous devons douter et nous interroger sur la validité et la durabilité de la transition énergétique et numérique, car les signaux d'alerte sont nombreux. Il faut plus de transparence et d'informations.

CHANGEMENT CLIMATIQUE

POLLUTION ATMOSPHERIQUE ET TRANSPORT ROUTIER

L'incapacité de la société à prévenir une pollution telle que la pollution atmosphérique met en évidence l'échec du système de règles et de contrôles qui, dans des pays comme l'Italie, est géré par des centaines de structures publiques et privées. La crise environnementale se manifeste par le gaspillage de ressources importantes pour les infrastructures telles que les routes et les autoroutes, tandis que les budgets de l'État dans les domaines de l'environnement et de la culture sont réduits.⁸⁷⁵

La pollution atmosphérique est à l'origine d'énormes coûts de santé : l'air est de plus en plus pollué et les gens en meurent.⁷³⁶ En Italie, le nombre de décès dus à la pollution atmosphérique est d'environ 1.500 par million d'habitants, alors qu'il est de 1.100 par million d'habitants en Allemagne, de 800 en France et de 600 en Espagne.¹⁹⁶ Parmi les principales causes figurent le trafic routier, le chauffage, l'industrie et l'agriculture. De nombreuses études ont maintenant confirmé qu'il existe une relation positive entre les concentrations totales et la fréquence des effets : il n'y a pas de valeur seuil en dessous de laquelle il n'y a pas d'effets indésirables.

Les poussières émises dans l'atmosphère par la combustion sont nocives pour la santé, et le risque pour la santé dépend de leur concentration, de leur taille et de leur nature chimique, ainsi que d'autres facteurs tels que la durée d'exposition et la susceptibilité individuelle. Les particules plus petites représentent un plus grand danger pour la santé humaine, car elles peuvent pénétrer profondément dans le système respiratoire. La poussière provoque la toux, l'essoufflement, l'asthme, l'irritation des voies respiratoires et, à long terme, favorise les crises cardiaques, les accidents vasculaires cérébraux et les cancers respiratoires. Des études épidémiologiques ont montré une corrélation entre les concentrations de poussière et l'apparition de maladies respiratoires chroniques telles que l'asthme, la bronchite et l'emphysème. Les particules contiennent des substances hautement toxiques telles que les hydrocarbures aromatiques polycycliques.

La poussière fine générée par le transport routier est depuis longtemps considérée comme l'une des principales causes de cancer dans les zones urbaines.^{572, 881} La poussière émise par les moteurs *diesel* est classée comme cancérigène. La combustion du diesel produit des centaines de substances différentes, dont l'acétaldéhyde, le formaldéhyde, l'acétone, les alcanes, les dioxines, les hydrocarbures aromatiques polycycliques, le soufre, l'azote (par exemple l'ammonium), le zinc, le cadmium, le plomb et le fer.⁸⁷⁸ Parmi les composants les plus dangereux présents dans les poussières fines générées par les moteurs diesel figurent les hydrocarbures aromatiques polycycliques (dans le contexte urbain, jusqu'à 40% du carburant diesel est utilisé pour le chauffage). L'exposition chronique, tout au long de la vie (70 ans), aux particules des moteurs *diesel* augmente la probabilité de 300 cas de cancer par million de personnes exposées pour chaque microgramme supplémentaire dans un mètre cube.⁸⁸³ Selon cette étude, pour réduire le risque, il faudrait théoriquement habiter à au moins 500 m des routes à fort trafic, afin que l'effet de dilution ramène la concentration à des niveaux moins dangereux.

Les émissions des moteurs *diesel* provoquent une irritation des yeux et des muqueuses, une toux, des maux de tête, des vertiges, une perte d'odorat, de l'asthme, des allergies, des maladies cardiovasculaires, et sont certainement mutagènes et génotoxiques.⁸⁷⁸ La vie urbaine est associée à une fréquence deux fois plus élevée de décès par cancer du poumon pour une même exposition à la fumée de tabac.

En général, la poussière atmosphérique raccourcit l'espérance de vie d'un Européen, en moyenne, de huit mois ; mais pour les Italiens, elle est estimée à neuf mois, et pour ceux qui vivent dans la vallée du Pô : deux ans d'espérance de vie en moins.⁸⁷⁶

Le Centre international de recherche sur le cancer a classé certains hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP à 4 ou 6 cycles) parmi les agents cancérigènes possibles et probables pour l'homme. La plupart des HAP sont capables de provoquer des tumeurs chez les animaux de laboratoire (par exemple par inhalation). Chaque augmentation de 1 ng/m³ de benzo(a)pyrène (un HAP cancérigène) dans l'atmosphère peut entraîner un risque de neuf nouveaux cas de cancer pour 100.000 personnes. Environ 4% des cancers professionnels en Italie sont attribués aux HAP : le premier cancer professionnel décrit est l'épithélioma du scrotum chez les ramoneurs anglais, dû au contact avec la suie et sa teneur en HAP. Outre l'inhalation, une voie d'exposition importante pour l'homme est l'ingestion de produits agricoles et d'élevage contenant des molécules bioconcentrées.⁸⁸⁶ De nombreux effets toxiques autres que le cancer, touchant la peau, le système respiratoire, le système immunitaire et le système reproducteur, ont également été mis en évidence dans des études sur les animaux.

Une étude a évalué l'impact de la pollution atmosphérique sur la santé de 39 millions de personnes vivant dans 25 grandes villes européennes.¹²⁵⁸ Un résultat important est que la réduction de la concentration de particules PM_{2,5} jusqu'à 10 µg/m³ (le niveau annuel fixé par les directives de l'Organisation mondiale de la santé sur la qualité de l'air) peut entraîner une augmentation de l'espérance de vie allant jusqu'à 22 mois chez les personnes âgées de 35 ans et plus vivant dans les 25 villes étudiées. Si la concentration annuelle moyenne de PM_{2,5} à Rome était réduite à 10 µg/m³, 1.278 décès (dont 997 dus à des causes cardiovasculaires) pourraient être évités, et la population âgée de 30 ans et plus gagnerait une année de vie.

En conclusion, décider du niveau de risque sanitaire ou environnemental à accepter relève davantage d'un choix politique que d'un choix scientifique. Il n'est pas possible de fixer un seuil de concentration en dessous duquel nous pouvons être sûrs de l'absence d'effets néfastes sur la santé humaine ou l'environnement. Jusqu'à présent, nous n'avons même pas été en mesure de respecter les concentrations de protection de la qualité de l'air que nous avons autorégulées (par exemple, les concentrations à ne pas dépasser pour les poussières fines). Il a donc été impossible de se conformer même aux seuils arbitraires fixés par les politiciens.

Il est très peu probable que le fait d'encourager ou de promouvoir indirectement (par exemple en limitant la circulation aux voitures d'une classe Euro inférieure ou en introduisant des péages différents, en fonction des émissions de combustion par kilomètre) la mise au rebut et le remplacement des vieilles voitures avant qu'elles ne deviennent irréversiblement inutilisables en raison de leur âge, produise une diminution des émissions et des autres facteurs polluants, car

- les voitures sont remplacées lorsqu'elles ont encore de nombreux kilomètres à parcourir avant de devenir inutilisables.
- La mise à la casse d'une voiture usagée et la construction d'une nouvelle voiture peuvent produire plus d'émissions que ce que l'on pourrait obtenir en appliquant une meilleure technologie à la nouvelle voiture.
- Les vieilles voitures sont souvent remplacées par des voitures plus grandes et plus lourdes, de sorte que la réduction des émissions est annulée par l'augmentation de la puissance, l'utilisation accrue de matériaux et l'amélioration des performances.

Les émissions dues à la mise au rebut augmentent au lieu de diminuer. Les émissions peuvent être déplacées des centres urbains vers les sites de construction et de démolition. Les nouvelles voitures comportent de plus en plus de technologies et donc de nouveaux matériaux, qui deviennent rares et précieux, ce qui a également un impact négatif sur l'épuisement des ressources limitées. Il serait beaucoup plus judicieux de promouvoir l'utilisation d'autres modes de transport, comme le train, au lieu des véhicules à quatre roues. La réduction des transports privés dans des zones toujours plus grandes est nécessaire. Aucune amélioration technologique

ne sera suffisante pour compenser l'augmentation incontrôlée du volume du trafic. Promouvoir la mise au rebut des vieilles voitures avec des fonds publics dans l'espoir de réduire les émissions est une folie. Il est sûrement plus avantageux d'utiliser les ressources publiques pour améliorer l'accessibilité à des moyens de transport alternatifs et moins polluants.

En Europe, les produits alimentaires parcourent en moyenne 1.640 km rien que du fournisseur au point de vente. Mais si l'on prend en compte l'ensemble du processus, de la production à la distribution, cela représente plus de 6.000 km. ²⁷ Les coûts environnementaux, les "externalités" associées à la pollution atmosphérique, ne sont généralement pas pris en compte, bien qu'ils soient très importants :

- la pollution de l'eau ;
- la pollution des sols ;
- la pollution alimentaire ;
- le changement climatique ;
- l'acidification des océans ;
- la réduction de la biodiversité ;
- la réduction de la disponibilité des ressources naturelles.

La pollution atmosphérique génère une élévation de la température qui aura également une incidence sur la productivité et les coûts dans les exploitations agricoles : la disponibilité des aliments pour animaux diminuera, les problèmes de parasites (tiques et acariens, par exemple) augmenteront. En Inde, la hausse des températures entraînera une diminution de la production de lait d'au moins 2% par an (environ 1,8 million de tonnes). ⁸⁷⁹ Le changement climatique, dû à l'augmentation de la pollution atmosphérique, obligera les agriculteurs de nombreuses régions de la planète à choisir des espèces plus petites, plus résistantes à la chaleur et aux maladies et nécessitant moins de soins.

CHANGEMENT CLIMATIQUE : TROP PEU, TROP TARD

Il est possible d'appeler les combustibles fossiles le "*soleil enfoui*" car ils sont dérivés de l'énergie solaire reçue pendant des millions d'années. Par exemple, le charbon provient des restes fossilisés de plantes qui vivaient dans des marécages il y a probablement des millions d'années. ⁶⁴² La plupart de l'antracite pourrait provenir de plantes qui vivaient il y a 360 à 290 millions d'années, une période appelée Carbonifère. Il n'y avait ni mammifères ni oiseaux, mais des araignées d'un mètre de long et d'autres animaux dont les restes fossiles nous étonnent aujourd'hui. Au Carbonifère, il aurait été possible de rencontrer des mille-pattes de deux mètres de long et des libellules d'une envergure de 70 centimètres. ¹⁴

Le pétrole pourrait être dérivé de formes de vie qui peuplent les océans, semblables au phytoplancton. Pour générer du pétrole, il faut un processus long et difficile, qui nécessite plusieurs étapes comme la cuisson de la matière organique pendant des millions d'années (les cires et les graisses dont il est dérivé doivent être cuites entre 100 et 135°C pendant des millions d'années avant d'être transformées en pétrole). ⁶⁴² Il est probable que la transformation de plus de cent mille tonnes de matière organique, après des millions d'années, puisse donner 4 kilos de pétrole. Nous pouvons donc dire que nous brûlons chaque année la quantité de "*soleil enfoui*" qui a été accumulée par les plantes pendant des centaines d'années et transformée pendant des millions d'années. La combustion d'un kilo de méthane permet d'obtenir 14.000 kcal, d'un kilo de diesel 11.000 kcal, d'un kilo de charbon 8.000 kcal et d'un kilo de bois de chauffage moins de 4.000 kcal. ³⁶ Les énergies fossiles constituent donc un concentré qui, s'il est facile à extraire, offre une bonne perspective de profit. Toutefois, ces différentes sources d'énergie ne sont pas entièrement interchangeables. Le pétrole est aujourd'hui la source la plus importante en raison de ses nombreuses utilisations, tant dans le domaine énergétique que dans la production de

produits manufacturés et synthétiques. Par exemple, l'industrie chimique est fortement tributaire du pétrole (par exemple, les plastiques) et le secteur des transports en dépend presque entièrement : 97% des transports sont tributaires des produits pétroliers.¹⁵ Le gaz naturel est principalement utilisé dans le secteur de l'énergie (chaleur et électricité), le charbon est très important pour la production d'électricité et la production métallurgique (le charbon a besoin de pétrole pour être transporté).

Dans l'histoire de notre planète, les géologues ont du mal à trouver une période du passé où les caractéristiques de l'atmosphère ont changé aussi rapidement qu'aujourd'hui. Pour trouver une atmosphère dont la composition est similaire à celle d'aujourd'hui, il faut probablement remonter au moins 55 millions d'années en arrière : notre espèce existe depuis moins de 2 millions d'années, mais nous avons conquis la planète il y a 12000 ans.⁷⁷⁴ En 12000 ans (c'est l'holocène, l'ère du berceau de l'humanité), le climat a été bénin et prévisible et nous a permis d'inventer l'écriture, l'agriculture et l'élevage. La température moyenne de la planète a fluctué de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ au maximum. Le climat a donc été constant, prévisible et bienveillant pour l'humanité.

Nous faisons reculer l'horloge climatique de plusieurs millions d'années, mais dans des conditions qui n'ont probablement jamais existé. L'Holocène était notre paradis : l'espèce humaine est passée de quelques millions à quelques milliards d'individus parce que notre habitat était parfait. Pour inverser la dangereuse expérience en cours, nous devons agir maintenant, en renaturalisant au moins 50% de la surface de la terre et la plupart des océans. Nous sommes entrés dans l'Holocène en étant probablement moins de 5 millions, mais nous sommes sur le point d'en sortir en étant presque 10 milliards : nous sommes entrés dans l'Anthropocène, l'ère dominée et empoisonnée par les humains. L'espèce humaine restera principalement accompagnée des quelques êtres vivants domestiqués et sélectionnés artificiellement en laboratoire, c'est-à-dire complètement dépendante d'un système fragile et non durable : on peut appeler cette époque l'Erémocène ; nous resterons seuls, ce sera donc une époque courte ; aucune espèce ne peut survivre longtemps sans les autres.

Nous pouvons dire que nous vivons dans des conditions nouvelles, car nous n'avons jamais connu une telle atmosphère : nous sommes le cobaye d'une expérience menée par nous-mêmes. En fait, il ne fait plus aucun doute que nous sommes la cause de ce changement soudain.

Il y a probablement peu de fois dans l'histoire de la science qu'il y a eu un consensus aussi large que sur les causes du changement climatique.^{456, 458} Pourtant, il est très facile de trouver des informations ou d'écouter des interviews de politiciens (influent) qui nient les preuves et le consensus scientifique.⁴⁵⁷ L'univers de la pseudo-science et l'industrie du doute sont très actifs dans l'enrôlement des mercenaires et des médias de masse. Le scepticisme est alimenté par des investissements considérables et des stratégies diaboliques financées par les grandes entreprises.²⁶⁰ Ici, l'attaque contre la crédibilité de la science est systématique et inélégante. Les intérêts économiques à court terme de quelques grandes entreprises passent avant tout le reste : la santé et la sécurité collectives.

Un aspect intéressant de la science du changement climatique est qu'elle met à jour et modifie ses prédictions de manière continue et rapide. La littérature scientifique est très abondante et il est donc difficile de la tenir à jour. Cependant, on peut également dire qu'au cours des 20 dernières années, les prévisions ont presque toujours été actualisées par de plus mauvaises : par exemple, sur les prévisions de la fonte des glaciers arctiques ou de la libération de méthane par la fonte du *permafrost* en Sibérie. En fait, en très peu de temps, la vitesse des changements négatifs a augmenté et le risque est d'être trop optimiste. Être optimiste est un avantage : cela augmente la longévité et réduit le risque d'infarctus, mais il ne faut pas prendre le risque d'épouser l'optimisme simplement pour soutenir le déni des preuves.⁹⁷⁵ À l'inverse, le changement climatique est trop souvent perçu comme abstrait, distant, invisible et douteux.

Les émissions mondiales de dioxyde de carbone provenant des combustibles fossiles ont augmenté en moyenne de 1,5% par an au cours de la décennie 2008-2017 et les émissions

globales de dioxyde de carbone ont augmenté d'environ 3% : 40% provenant du charbon, 35% du pétrole et 20% du méthane (Chine + 3% par an ; Inde + 5,2% par an).^{680, 776} En 2018, les émissions annuelles dérivées de l'énergie ont atteint le niveau record de 33,1 Gt, dont plus d'un tiers provient du charbon : la demande d'énergie augmente.

En Europe, la mobilité dans les zones urbaines est responsable de 40% des émissions totales de dioxyde de carbone (CO₂) et de 70% des autres polluants.⁸⁷⁷ L'OCDE (Organisation de coopération et de développement économiques) a estimé qu'en Italie, le transport est responsable de 31% de toutes les émissions de dioxyde de carbone, le transport routier étant le plus important (82%). Bon nombre des problèmes liés à la mobilité privée, tels que la pollution, les accidents, le bruit et la réduction de la qualité de vie, sont imputables au fait que l'énergie est très bon marché. Alors que le prix des énergies fossiles tend à augmenter, l'organisation d'une nouvelle société basée sur les économies d'énergie et la mobilité collective peine à se mettre en place. Par conséquent, la consommation de pétrole en Italie est élevée : entre 600 et 700 kilos avec des pics, dans certaines régions, de plus de 1.000 kilos d'équivalent pétrole par habitant et par an.

Certains pays émergents atteignent les niveaux de consommation des Européens. Pour donner un exemple, la Chine a connu en 30 ans la croissance que l'Europe a connue en deux siècles, avec une population au moins trois fois plus importante (entre 2011 et 2013, la Chine a produit plus de ciment que les États-Unis d'Amérique pendant tout le XXe siècle).⁹⁷⁷ Les trois quarts de l'augmentation des émissions mondiales de gaz à effet de serre au cours de la décennie 2010-2020 ont été générés en Chine. L'extraction et la production de matières premières telles que le ciment, l'acier et l'aluminium sont responsables de l'émission d'au moins 20% des gaz qui altèrent le climat de la planète.⁹⁸⁰ Notre modèle de développement n'est pas durable et il est impensable d'espérer le perpétuer indéfiniment pour tous les habitants de la Planète.

Il n'y a plus de doute : les activités humaines sont la principale cause du changement climatique. Nous avons réussi à augmenter la température moyenne de la planète d'au moins 1°C par rapport à l'ère préindustrielle (1850). Les émissions cumulées de dioxyde de carbone entre 1870 et 2016 se sont élevées à 2.080 Gt (giga tonnes ou milliards de tonnes) ; en 1870, l'énergie hydroélectrique aux États-Unis d'Amérique fournissait les trois quarts de l'énergie industrielle utilisée.⁹⁷⁷ Selon certains centres de recherche faisant autorité (IPPC), si nous voulons avoir une chance de ne pas générer un changement climatique indésirable et irréversible, nous ne devrions pas dépasser l'émission de 2.350 milliards de tonnes de dioxyde de carbone.⁷⁶² Le résultat est que nous disposons d'environ 300 Gt d'émissions, ce qui correspond à ce que nous émettons dans l'atmosphère en moins de 7-8 ans. Les réserves souterraines de combustibles fossiles constituent un potentiel de dioxyde de carbone estimé entre 31.300 Gt et 50.000 Gt, soit 15 fois ou 25 fois plus que les émissions cumulées entre 1870 et 2016, qui s'élèvent à environ 2.080 Gt. De ce point de vue, on peut dire que nous disposons d'un arsenal fossile souterrain capable de détruire plusieurs fois le climat propice à notre survie. Les combustibles fossiles devront rester dans le sol pour contenir le changement climatique et les catastrophes qui en découlent. Les émissions par habitant devront être réduites à moins de 2 tonnes de dioxyde de carbone par an, au lieu de plus de 7 tonnes par habitant en Italie ou de plus de 20 tonnes aux États-Unis. Si l'on tente de brûler tous les combustibles fossiles disponibles, la planète deviendra certainement inhospitalière et invivable avant qu'ils ne soient épuisés.

Il est possible d'affirmer que l'émission de moins de 600 Gt de gaz à effet de serre équivalents au dioxyde de carbone dans les prochaines années sera suffisante pour atteindre un niveau d'énergie du système climatique de la Terre très dangereux pour la survie de la biosphère et, par conséquent, de l'humanité.⁷⁷⁵ Sachant que les émissions actuelles s'élèvent à environ 50 Gt (53,5 Gt enregistrées en 2017) par an, cela signifie que les concentrations capables de provoquer une hausse irréversible et dévastatrice de la température seront atteintes d'ici quelques années.

Les 4 milliards d'hectares de forêts du monde, qui occupent environ 30% de la surface de la terre, retiennent environ 50% du carbone (283 Gt) contenu dans l'atmosphère. Entre 1990 et 2005, en raison de la destruction des forêts, la quantité de gaz piégée dans la végétation a diminué d'environ 1,1 Gt par an.⁷⁰³ Au lieu de reboiser la planète, ce qui produirait également de nombreux autres avantages essentiels à notre survie, nous nous dirigeons précipitamment dans la direction opposée.

À l'heure actuelle, il semble impossible d'atteindre les objectifs de réduction du changement climatique proposés, car il faudrait passer d'environ 50 Gt de dioxyde de carbone émis chaque année à un niveau quasi nul avant 2050. Aujourd'hui, chaque habitant de la planète produit en moyenne environ 4 tonnes de dioxyde de carbone par an, mais les pays industrialisés en produisent beaucoup plus : plus de 20 tonnes par habitant et par an aux États-Unis (l'Italie importe pratiquement tous les combustibles fossiles qu'elle utilise, comme le méthane de Russie et de Libye). Nous devons réduire radicalement ces émissions en moins de 30 ans : est-ce possible ?

Pour ne pas dépasser une augmentation dangereuse de la température (+2°C par rapport à l'ère préindustrielle, sachant que nous avons déjà brûlé 1°C depuis 1850), il faudrait probablement laisser dans le sol la plupart des combustibles fossiles connus.^{761, 774, 844} À l'heure actuelle, même de faibles réductions des niveaux d'émission actuels, de l'ordre de 10 ou 20% d'ici 2050, constituent une mission impossible, une utopie. Pourtant, de telles petites réductions ne retarderaient pas de manière significative les catastrophes annoncées.

Il est irréaliste de penser que les échéances fixées par les accords climatiques (bien que volontaires) pourront être respectées. Le phénomène nous frappe beaucoup plus vite qu'on ne le croit, même si, lorsque l'on écoute ceux qui s'occupent des questions climatiques (les experts), il règne, dans de nombreuses conversations, une atmosphère de panique contenue. Malheureusement, le scénario le plus réaliste est que les températures moyennes augmenteront en raison de l'accroissement des émissions.

En raison des émissions de gaz qui altèrent le climat, la température devrait augmenter d'au moins 0,2°C tous les dix ans.⁷⁷⁵ Les promesses faites lors de conférences importantes, comme l'accord de Paris, qui sont entièrement volontaires, sont des chimères irréalistes, des déclarations sans les moyens de les mettre en œuvre.⁷⁷⁶

Les sommets mondiaux sur le climat et l'environnement soulignent l'asservissement de la politique aux marchés et à la finance. Dans le contexte alarmant où l'effondrement de l'environnement est à nos portes, il est de plus en plus évident que ni les politiciens ni les hommes d'affaires ne peuvent être considérés comme des alliés pour contrer les changements catastrophiques tels que le changement climatique. Il s'agit de protéger des valeurs non négociables, indispensables à l'humanité et aux non-humains, dont nous sous-estimons la dépendance et les relations.

En quelques années, les concentrations de certains gaz à effet de serre tels que le dioxyde de carbone, le méthane et le protoxyde d'azote sont devenues les plus élevées depuis 800.000 ans et nous ignorons les prévisions catastrophiques. La concentration de dioxyde de carbone dans l'atmosphère est passée de 277 parties par million en 1750 à plus de 417,6 en mars 2021, soit une augmentation de 37%.⁷⁷⁷ La plupart de ces émissions proviennent des combustibles fossiles et du changement d'affectation des sols : déforestation, agriculture, élevage, urbanisation, incendies, désertification, sécheresse, érosion, salinisation, etc. Les émissions totales rejetées dans l'atmosphère ont été redistribuées par des cycles naturels entre les différentes zones de la biosphère : dans l'atmosphère environ 44%, dans le sol environ 29% et dans les océans 22% (décennie 2008-2017).⁷⁷⁶

JOUER AVEC L'AVENIR

À ce stade, il convient de réfléchir à cet aspect important : qui devrait déterminer la quantité acceptable d'émissions de gaz altérant le climat que nous pouvons nous permettre de produire dans les années à venir ? Les scientifiques, les compagnies pétrolières, les politiciens, les associations environnementales, les militaires spécialistes des catastrophes, nous ? Derrière cette question se cache une grande faiblesse de tout le système, une grande inconnue : sommes-nous sûrs de connaître les limites de notre capacité de prévision scientifique ? Ce sont des problèmes énormes, épineux, avec des marges d'incertitude et d'imprévisibilité qui ne peuvent être estimées à long terme. L'approche réductionniste, c'est-à-dire l'approche compartimentée visant à résoudre des prévisions individuelles, partielles et limitées, n'est pas fiable à court terme. Le système réel est complexe et beaucoup plus vulnérable que nous pouvons probablement le prévoir. L'incertitude, l'imprévisibilité, la complexité ainsi que la fragilité et le manque de connaissances sont des éléments qui ne permettront pas de faire des prévisions précises. Nous courons donc le risque évident et prévisible de l'inaction, en attendant des certitudes qui ne viendront pas : nous laisserons le pire visage de l'Anthropocène se manifester inexorablement. Compte tenu de l'enjeu, il vaudrait mieux agir avant de comprendre et de savoir. Il ne s'agit plus d'attendre les résultats d'un exercice scientifique qui reste à élaborer, mais de faire des choix nécessaires au bien-être de tous. Nous risquons d'être présomptueux et en même temps de prendre trop de risques si nous continuons à espérer comprendre les problèmes environnementaux avant qu'ils ne provoquent des bouleversements. Il n'est pas possible d'attendre des certitudes scientifiques, les changements sont très rapides et irréversibles. Il faut organiser la résilience, construire une autre forme de société, attentive aux équilibres écologiques.

Nous vivons dans un système fini dans lequel toutes les ressources sont limitées, comme la terre et les énergies non renouvelables. Même les énergies renouvelables comme la biomasse (par exemple le bois de chauffage) ou l'énergie solaire doivent être adaptées à un système qui présente d'énormes limites. La biomasse soustrait des terres et des ressources à la production alimentaire, et les panneaux solaires nécessitent des matériaux qui sont disponibles en quantités limitées et occupent également des terres agricoles. Des choix importants nous attendent donc, qui ne pourront être faits raisonnablement que si des aspects actuellement sous-estimés, tels que les aspects éthiques et environnementaux, sont également pris en compte. Le changement climatique de l'ère industrielle est l'histoire d'un échec, d'un report de choix importants. La vérité a été dissimulée par des opérations cyniques et des mensonges. Nous pouvons dire que des centaines de traités et d'accords internationaux conclus par les gouvernements pour protéger l'environnement ont échoué.⁶⁸⁰ Les changements nécessaires pour réduire cette transformation climatique apocalyptique sont impopulaires parce qu'ils sont effrayants. Les nations les plus riches devraient commencer par réduire leurs émissions d'au moins 15% chaque année. Cela signifie ne pas utiliser de voitures, ne pas voyager en avion, bouleverser la production agricole, qui consomme aujourd'hui au moins 10 fois plus d'énergie (en termes de combustibles fossiles) qu'elle n'en produit (en termes de calories dans l'assiette), ne pas produire de plastique, consommer des aliments produits localement, réduire la consommation de sous-produits animaux, ne pas gaspiller les terres pour produire des agro-carburants et des agro-plastiques, lutter contre l'obsolescence programmée.⁷⁴¹ Il y a des limites effrayantes à accepter, surtout par la fraction aisée de la planète. Peut-être que si la majorité des gens savaient ce que l'on sait des changements en cours, nous serions en mesure d'organiser une société plus durable et moins gourmande en énergie, sans plonger dans un effondrement social et économique très dangereux. Pour réaliser ces changements, il faudrait laisser les combustibles fossiles dans le sol, mais les politiques concrètes dans ce sens ne sont pas évidentes : même si en ce moment notre maison est en danger, est en feu, nous restons indifférents. Certains pensent qu'il faut laisser faire les

administrateurs, mais la volonté politique dans ce domaine est apparemment absente. Si nous continuons à ignorer ce problème et à utiliser les combustibles fossiles, avant la fin du siècle, la température moyenne de la planète pourrait augmenter de plus de 4°C, bien au-delà du seuil que nous avons arbitrairement fixé comme marge de sécurité, en jouant avec l'avenir. ⁷⁷⁴

LE CYCLE DU CARBONE

Les plus grandes réserves de carbone se trouvent dans les sédiments fossiles, qui contiennent environ 40.000 Gt (1 Gt = 10⁹ t) de carbone, dont au moins 4.000 peuvent être utilisés comme combustibles fossiles. Les océans contiennent environ 38.000 Gt, soit au moins 51 fois le contenu de l'atmosphère. Sur terre, le plus grand puits de carbone est le sol, tandis que l'atmosphère a le plus petit puits de carbone, environ 750 Gt. ⁶²⁴

L'aspect le plus intéressant du cycle du carbone est celui des flux entre les différents compartiments. Entre la terre et les océans, il y a un transport de carbone organique dissous dans les eaux fluviales. Un flux équivalent se produit en termes de carbone inorganique. Cependant, les flux de carbone les plus importants se situent entre les océans et l'atmosphère, et entre les terres et l'atmosphère. L'échange de carbone entre les océans et l'atmosphère est d'environ 92 Gt/an dans le sens de l'atmosphère vers les océans, et d'environ 90 Gt/an dans le sens inverse. Les océans font donc office de puits pour le carbone atmosphérique, principalement en raison de la capacité du dioxyde de carbone à se diffuser dans les eaux de surface et à se déposer sous forme de carbonates dans les profondeurs de l'océan. ⁶²⁴ Les océans absorbent environ 30% du dioxyde de carbone généré par l'homme et plus de 90% de la chaleur. ⁹⁷⁷

Le bilan carbone planétaire comporte d'autres facteurs qui dépendent largement des activités humaines : l'utilisation de combustibles fossiles et la déforestation. L'utilisation de combustibles fossiles et la déforestation introduisent chaque année des milliards de tonnes de carbone dans l'atmosphère, et la tendance est à la hausse. La réduction de la fertilité des sols, le dégel des sols gelés (*pergélisol*), la fonte des glaciers et l'altération des océans (acidification, augmentation de la température, pollution et effondrement des chaînes alimentaires) augmentent également les flux nets de carbone vers l'atmosphère. Globalement, en raison des activités humaines, il y a une émission nette de carbone dans l'atmosphère. Comme on le sait, face à ces facteurs inconnus de notre atmosphère avant la révolution industrielle, la concentration de dioxyde de carbone dans l'atmosphère est passée de 280 ppm à l'ère préindustrielle (cette concentration a peu fluctué au cours des 600.000 années précédant 1850) à 417 ppm aujourd'hui et continue d'augmenter. Au cours des 12.000 ans qui ont précédé l'ère industrielle, la température a fluctué d'un degré. Le seuil de sécurité que nous avons arbitrairement fixé selon des critères anthropocentriques est de 350 ppm, tandis que le point de non-retour se situe autour de 450 ppm mais aujourd'hui nous avons atteint plus de 417 ppm. Nous avons porté la concentration de dioxyde de carbone à 20% au-dessus du seuil de sécurité et à 7% en dessous du niveau maximal que nous avons fixé comme objectif de sauvegarde : il est très probable que si nous dépassons la concentration de 450 ppm, la température moyenne de la planète augmentera de plus de +2°C. Une différence de moins de 6-7°C dans la température moyenne fait la différence entre une planète sans glace et une planète glacée. La différence entre une planète inhospitalière et une planète qui permet l'agriculture et le développement de la société humaine est une question de quelques degrés, probablement même moins de 5°C. Nous faisons reculer l'horloge climatique de plus de 5 millions d'années, voire de 10 millions d'années selon de nombreux chercheurs. Nous respirons un air dont la composition n'a jamais été enregistrée au cours des deux millions d'années d'évolution qui nous séparent de nos ancêtres vivant dans les arbres en Afrique.

LE RÉVEIL DES GÉANTS

Les prédictions présentent de nombreuses faiblesses dans la mesure où certains changements peuvent se produire beaucoup plus rapidement et plus tôt que nous ne le pensons. En fait, certains changements suivent des relations non linéaires, par étapes, entre la cause et l'effet, en faisant des sauts brusques. C'est ce qui pourrait se produire en raison du dégel soudain du *pergélisol*, c'est-à-dire du sol gelé toute l'année : le *pergélisol* occupe environ 15 millions de kilomètres carrés dans l'hémisphère nord, ce qu'on appelle la toundra (Russie, Canada). Le dégel de cette zone pourrait libérer d'énormes quantités de gaz à effet de serre (par exemple, du méthane), plusieurs fois supérieures aux émissions annuelles totales actuelles. Des centaines de milliards de tonnes de gaz altérant le climat pourraient être libérées rapidement dans l'atmosphère : entre 3.620 et 7.100 Gt. Il convient de rappeler que les émissions cumulées entre 1870 et 2016 s'élèvent à environ 2.080 Gt. Le potentiel du *permafrost* est donc effrayant : plus de 70 fois les émissions annuelles actuelles (environ 50 Gt) et au moins deux fois les émissions cumulées sur 150 ans (2.080 Gt). Le dégel prévisible du *permafrost* pourrait être décrit comme "le dangereux réveil du géant". Réduire de 0,5°C l'augmentation de la température moyenne de la Terre, c'est-à-dire passer de 2°C à 1,5°C, pourrait signifier qu'une zone de *pergélisol* de 5 à 8 fois la taille de l'Italie ne dégèlera pas. Ainsi, de petites augmentations pourraient déclencher des rejets soudains et considérables de gaz altérant le climat, avec des effets que nous ne pouvons pas prévoir en détail. Mais nous sommes sûrs que la sécurité sociale et la santé seront compromises.

Il n'existe aucune prévision ferme des effets, par exemple, d'un doublement de la concentration de gaz altérant le climat dans l'atmosphère, qui, au rythme actuel, se produira avant la fin de ce siècle. En raison de l'incertitude et de l'impossibilité de prévoir, la roulette climatique ne manquera pas de réserver des surprises désagréables.

Il existe deux autres géants qui devraient susciter l'inquiétude et l'alarme : les glaciers, tels que les glaciers polaires et du Groenland, et les océans. Les mers, comme les glaciers de toute la planète, sont attaquées avec des effets à long terme imprévisibles, bien que largement évidents. La température des océans augmente, l'acidité a augmenté, la pollution a atteint des niveaux inacceptables (par exemple, le plastique), la quantité d'oxygène dans les mers diminue. La biodiversité est également en train de se réduire de manière drastique en raison de nombreux facteurs, dont la surpêche, la pollution et l'acidification. Les océans ont absorbé la majeure partie de la chaleur de la planète (90%) et au moins 30% de son dioxyde de carbone, produisent environ 50% de son oxygène et constituent un énorme réservoir de dioxyde de carbone, plusieurs fois supérieur à la quantité enregistrée dans l'atmosphère. L'effondrement des équilibres chimiques, physiques et biologiques des océans, ainsi que des échanges avec l'atmosphère, pourrait entraîner des rejets soudains et considérables de dioxyde de carbone dans l'atmosphère, une élévation du niveau des mers, une diminution de la production d'oxygène et une augmentation des phénomènes extrêmes tels que les ouragans. ^{680, 686} Il est difficile de prévoir exactement comment ces trois géants (océans, glaciers et permafrost) réagiront au cours des 10 à 30 prochaines années, mais nous disposons d'informations très fiables sur la tendance. L'incertitude porte sur la vitesse du changement et l'ampleur, mais pas sur la direction : ⁶⁸⁶

- d'ici 2100, la température moyenne de la planète pourrait être supérieure de +1°C à plus de +6°C à celle d'aujourd'hui ;
- les océans pourraient être un peu plus d'un mètre plus haut et jusqu'à plusieurs mètres plus haut qu'aujourd'hui (au moins 4% de la population et de la production mondiale se trouvent à moins de 10 mètres au-dessus du niveau de la mer) ;
- avant la fin du siècle, l'extinction pourrait toucher entre 20% et plus de 50% des espèces vivantes ; dans certains écosystèmes, la destruction de la biodiversité pourrait toucher plus de 90% des espèces, comme les récifs coralliens et les forêts primaires.

Les réponses aux différents incréments ne sont pas linéaires, de sorte que de petits changements génèrent des effets très différents en intensité et en étendue.

Il est également moralement correct de faire une autocritique : nous sommes présomptueux au point de croire que nous pouvons prévoir tous les effets du changement climatique, mais des phénomènes synergiques peuvent survenir et amplifier l'ampleur du changement climatique de manière totalement inattendue.

LE CHANGEMENT CLIMATIQUE NUIT À LA BIODIVERSITÉ ET À LA SÉCURITÉ ALIMENTAIRE

Les êtres vivants travaillent ensemble pour maintenir des équilibres importants pour le bien-être de l'espèce humaine. Les plantes produisent de l'oxygène, absorbent le dioxyde de carbone et régulent le climat. Au moins 50% de notre respiration est assurée par la photosynthèse dans les océans, qui ont absorbé au moins un tiers du dioxyde de carbone que nous émettons. La destruction des forêts et la dégradation des écosystèmes marins altèrent les conditions qui ont permis à l'humanité de prospérer pendant l'Holocène, c'est-à-dire pendant 12000 ans.

De petites augmentations de la température moyenne de la planète, par exemple de 2°C au lieu de 1,5°C, peuvent générer de grandes différences. Les changements se développent de manière exponentielle, de sorte que de petites augmentations de la température moyenne génèrent de grands changements qui sont dévastateurs pour la flore et la faune. L'une des causes importantes de la réduction de la biodiversité des pollinisateurs est le changement climatique.¹²⁴⁵

Les impacts prévus d'une série de scénarios de réchauffement sur différents groupes d'espèces dans les "zones prioritaires" pour la conservation sont alarmants (y compris la zone méditerranéenne).⁶²¹ Les 35 régions analysées contiennent une grande partie de la biodiversité la plus riche et la plus extraordinaire de la planète, y compris de nombreuses espèces emblématiques menacées et endémiques. Les accords internationaux sur le climat, tels que l'accord de Paris, proposent de limiter l'augmentation de la température moyenne mondiale à moins de +2°C, alors que les engagements nationaux actuels en matière de climat, à supposer qu'ils soient respectés, entraîneraient un réchauffement d'au moins 3,2°C. Le scénario le plus pessimiste, dit "*business as usual*", c'est-à-dire que rien ne change comme cela se passe malheureusement, conduirait à une augmentation de plus de +4,5°C : les experts considèrent qu'il s'agit d'une éventualité très catastrophique. Plus la température est élevée, plus le pourcentage d'espèces menacées est important. Avec un réchauffement de +4,5°C, près de 50% des espèces actuellement présentes dans les zones prioritaires seraient menacées d'extinction, mais si l'augmentation de la température était limitée à +2°C, ce risque serait réduit de moitié.⁶²¹ Cette prédiction souligne l'urgence de réduire les émissions de gaz à effet de serre.

Les plantes seront également particulièrement touchées, car elles sont souvent incapables de s'adapter assez rapidement à un climat qui change aussi rapidement. Par exemple, en Amazonie, on estime à 80.000 le nombre d'espèces végétales, dont beaucoup sont endémiques. Malheureusement, si les meilleurs objectifs pour réduire l'augmentation de la température de la planète sont atteints, une augmentation de moins de 2°C (par rapport à l'ère préindustrielle) pourrait entraîner l'extinction de 40% des espèces végétales. Si les engagements pris sont respectés, entraînant une augmentation de la température de la planète d'au moins 3°C, le taux d'extinction des plantes en Amazonie pourrait passer à 6 espèces sur 10 d'ici la fin du siècle.⁶²¹ Ces estimations ne tiennent pas compte d'autres effets qui pourraient s'avérer multiplicatifs, comme la déforestation, la fragmentation des habitats, les incendies, la colonisation par des espèces exotiques et d'autres facteurs liés aux activités humaines. Des effets catastrophiques similaires du changement climatique sont facilement prévisibles dans d'autres domaines d'intérêt

naturel. À Madagascar, le scénario optimiste d'une hausse des températures inférieure à +2°C suggère que cette grande île deviendra inhospitalière pour au moins un quart de ses espèces animales et végétales. Dans la région méditerranéenne, une augmentation de seulement +2°C pourrait entraîner l'extinction de 30% des espèces végétales et animales présentes aujourd'hui avant 2080.⁶²¹ En Afrique centrale, pour faire vivre une population de plusieurs dizaines de milliers d'éléphants, il faut pomper l'eau du sol. En Australie, la réalisation d'objectifs plus ambitieux en matière de limitation du changement climatique pourrait entraîner l'extinction de 60% de certains groupes d'animaux tels que les amphibiens. En raison de l'inertie du système climatique de la Terre, la planète se réchauffera dans une certaine mesure même si nous parvenons à réduire à zéro les émissions de gaz qui altèrent le climat ; en conséquence, les étés dans l'Arctique seront libres de glace dans les 20 prochaines années.

Le nombre d'espèces d'insectes susceptibles de disparaître à la suite d'une augmentation de la température moyenne de +2°C, au lieu de +1,5°C, est multiplié par trois : de 6% à 18%. Une augmentation de +0,5°C pourrait entraîner une double extinction du nombre d'espèces de plantes et de vertébrés : 8 à 16% pour les plantes et 4 à 8% pour les vertébrés. Ces prédictions ont été obtenues en étudiant seulement 105.000 espèces, soit moins de 1% des espèces existantes, de sorte qu'elles pourraient facilement se révéler optimistes.⁷⁷⁵

Les prévisions sont également catastrophiques pour les écosystèmes marins : les récifs coralliens pourraient être réduits de 70% à 90% si la température augmente de +1,5°C, tandis qu'ils pourraient disparaître (>99%) si l'augmentation est de +2°C. Si le réchauffement climatique se stabilise à +1,5°C (température moyenne) au-dessus des niveaux préindustriels (soit +0,5°C par rapport à aujourd'hui), l'océan Arctique sera libre de glace une fois tous les cent ans, en septembre (le mois où il y a le moins de glace). En cas de réchauffement global de +2°C, cela pourrait se produire une année sur trois.⁷⁷⁶ Dans l'Arctique, la glace de mer pérenne ne représente plus que la moitié de la superficie qu'elle occupait il y a 30 ans, et dans 30 ans, elle pourrait avoir disparu.⁶⁹⁹

L'épuisement de la cryosphère dans l'Arctique et les hautes montagnes menace également la sécurité alimentaire et la disponibilité de l'eau. Des études révèlent que l'augmentation du dioxyde de carbone dans l'atmosphère augmente le taux de croissance de certaines plantes, mais diminue leur valeur nutritionnelle. La concentration atmosphérique d'environ 550 parties par million de dioxyde de carbone, soit environ 37% de plus que la concentration actuelle, réduit dans le blé la quantité de zinc (9,3%), de fer (5,1%) et de protéines (6,3%).⁷⁷⁴ Des réductions similaires ont été décrites pour le riz, les petits pois et le soja. À l'échelle mondiale, il est plus probable que le changement climatique entraîne une réduction de la production alimentaire, même si l'augmentation du dioxyde de carbone favorise la croissance de certaines plantes.

L'un des effets du changement climatique est la propagation de certaines espèces d'insectes. Les criquets d'Afrique, qui sont de proches parents des sauterelles, en sont un exemple. Au début de 2020, des essaims de criquets de la taille d'une ville ont envahi plus de 15 pays d'Afrique de l'Est, du Moyen-Orient et d'Asie, dévastant les cultures.^{778, 1276} Il a été possible d'enregistrer des essaims volants de 70 milliards d'insectes qui font quatre fois la taille de la zone urbaine de Milan. Ces énormes essaims descendent en piqué sur les cultures et dévorent tout en quelques heures, ce qui constitue une menace sérieuse pour la sécurité alimentaire de millions de personnes. Aidés par le vent, ils volent à une vitesse d'environ 16-19 kilomètres par heure, parcourant 130 kilomètres ou plus en une journée.⁷⁷⁹ Dans le passé, en 1954, il y a eu de longues et spectaculaires migrations d'essaims du nord-ouest de l'Afrique vers les îles britanniques et, en 1988, de l'Afrique de l'Ouest vers les Caraïbes, soit une distance de cinq mille kilomètres en une dizaine de jours. Parmi les facteurs susceptibles d'avoir favorisé la prolifération de ces insectes figurent les cyclones qui, en 2018 et 2019, ont apporté de fortes pluies dans le désert. Il existe donc un lien entre le changement climatique et la crise générée par l'invasion de criquets qui touche des régions comme l'Éthiopie et l'Afrique de l'Est (dans

certaines de ces régions, des conflits sont en cours et des mines antipersonnel sont utilisées). Malheureusement, la prolifération de certains insectes entraînera une insécurité alimentaire accrue et la famine pour des millions de personnes.

Pour espérer enrayer la hausse probable des températures, nous devrions parvenir à des émissions nulles d'ici 2050 : cela signifie que les émissions anthropiques devront toutes être compensées par la capacité de la nature à les absorber. Les experts climatiques nous mettent en garde depuis plusieurs années : si nous laissons brûler ne serait-ce qu'un quart des stocks connus d'énergie fossile, les effets seront catastrophiques : le système agricole sera déstabilisé, ce qui entraînera une réduction importante des récoltes dans le monde entier. Il est tout à fait réaliste de penser que les récoltes des céréales les plus importantes pourraient être réduites de 10% pour chaque augmentation d'un degré de la température moyenne mondiale.

LA FRÉQUENCE DES PHÉNOMÈNES MÉTÉOROLOGIQUES EXTRÊMES AUGMENTE

Aujourd'hui, les concentrations de certains gaz à effet de serre (dioxyde de carbone, méthane et oxydes d'azote) sont les plus élevées jamais enregistrées au cours des 800.000 dernières années. Pour trouver des concentrations de dioxyde de carbone plus élevées qu'aujourd'hui, il faut probablement remonter 15 millions d'années en arrière : notre espèce est hébergée par la planète Terre depuis environ 2 millions d'années, et nous évoluons donc dans une atmosphère dont la composition n'a jamais été respirée auparavant. Il est probable qu'à la fin de ce siècle, les concentrations de dioxyde de carbone atteindront les niveaux enregistrés il y a 50 millions d'années, lorsque l'Antarctique était rempli de palmiers. Il est important de rappeler qu'à notre époque, les températures les plus basses enregistrées sur la planète ont été mesurées en Antarctique : -98°C.⁶⁹⁹

Le changement climatique pourrait à lui seul être responsable d'une réduction de 2% de la production alimentaire tous les dix ans, tandis que les économistes et les démographes prévoient une augmentation de 14% de la demande, également tous les dix ans.

L'évolution du régime des pluies et les sécheresses pourraient contraindre d'immenses superficies de terres agricoles à passer de l'irrigation à l'utilisation exclusive de l'eau de pluie ; avant la fin de ce siècle, la réduction de la disponibilité de l'eau pour l'irrigation pourrait toucher des millions d'hectares et entraîner une réduction ingérable des calories fournies par le maïs, le blé et le riz.⁷³⁶ Dans certains pays européens, une réduction de la production de maïs de 20 à 30 kg/ha par an est prévue avant 2050.⁸⁷¹ La sécheresse qui a sévi en Italie en 2017 a réduit la production céréalière de 30 à 50%, générant des dommages à l'agriculture italienne de plus de deux mille millions d'euros (Coldiretti). La production de pommes a chuté de 23%, avec des pics de 60% dans le Trentin.¹⁹⁶ La production de raisins et de légumineuses a également chuté de 70% en 2017 en raison de la sécheresse. Chaque année, des phénomènes météorologiques extrêmes sont enregistrés sur toute la planète, y compris en Italie, c'est-à-dire des records jamais atteints dans l'histoire récente. L'Italie est soumise aux effets du changement climatique de manière beaucoup plus importante que le reste de l'Europe. La température moyenne augmente davantage et les phénomènes météorologiques extrêmes font beaucoup plus de dégâts que dans le reste de l'Europe. Les températures sont de plus en plus hors normes (l'hiver 2019-2020 a été le plus chaud de tous les temps avec une température moyenne supérieure de +3,4°C à la période de référence de 30 ans 1981-2010 et avril 2020 a été le plus chaud en Europe depuis que des mesures sont effectuées) et les précipitations sont réduites : en Italie, les précipitations hivernales (2019-2020) ont été réduites de 43%.¹⁰⁰⁰ Des centaines de phénomènes météorologiques extrêmes se sont produits en Italie au cours de la dernière décennie. Il s'agit principalement d'inondations dues à de fortes pluies et à des glissements de terrain associés, de

tornades, de débordements de nuages, de sécheresses et de vagues de chaleur. Rien qu'en 2019, en Italie, 1.668 événements classés comme extrêmes ont été enregistrés, soit plus de 4 par jour (il y en avait 142 en 2008, 20 en 1999 et 18 en 1990).¹¹⁸⁰ Entre 1990 et 2020, 10.274 événements de ce type ont été enregistrés : tourbillons de sable ou de vapeur, grosses grêles réparties sur plusieurs zones, fortes pluies, tornades, fortes rafales de vent, fortes chutes de neige ou tempêtes de neige, gel, avalanches et foudre enregistrés tant à la surface de la terre que sur les plans d'eau : cette collection de données est très alarmante.¹⁰⁰¹ En Allemagne, 39.861 ont été enregistrés sur la même période (1990-2020), en France 23.910, au Royaume-Uni 4.649 et en Espagne 4.081. Au fil du temps, on a constaté une augmentation de la fréquence et de l'intensité des phénomènes météorologiques extrêmes en Europe : en 30 ans, la fréquence des phénomènes météorologiques extrêmes a été multipliée par plus de 80 en Italie, par plus de 64 en Allemagne (5.315 événements enregistrés en 2020 et 82 enregistrés en 1990), d'environ 127 fois en France (1.017 enregistrés en 2020 et 8 enregistrés en 1990), de plus de 169 fois en Espagne (679 enregistrés en 2020 divisés par 4 enregistrés en 1990) et de plus de 1.000 fois au Royaume-Uni (1.156 enregistrés en 2020 et un enregistré en 1990).¹⁰⁰¹ Globalement, dans la zone européenne, le nombre d'événements climatiques extrêmes enregistrés entre 1990 et 2020 s'élève à au moins 204.757 : de 152 événements extrêmes enregistrés en 1990 à 23.876 en 2020, soit une multiplication par 157 environ. Ces statistiques sont impressionnantes et indiquent une croissance alarmante et accélérée. Parmi les principales causes, on trouve les émissions de gaz qui altèrent le climat et qui, en Europe, représentent en moyenne au moins 8,7 tonnes d'équivalent dioxyde de carbone par habitant et par an (en Italie, la moyenne est d'environ 7,3 tonnes) ; en 2018, 114 millions de tonnes d'équivalent pétrole ont été consommées, dont au moins 36 millions de tonnes d'équivalent pétrole provenant du secteur des transports, 32 millions de tonnes d'équivalent pétrole provenant de la consommation d'énergie dans le secteur résidentiel, 18 millions de tonnes d'équivalent pétrole provenant de la gestion des déchets et 17 millions de tonnes d'équivalent pétrole provenant du secteur tertiaire).¹¹⁸⁰

CHANGEMENT CLIMATIQUE, POLLINISATEURS ET SÉCURITÉ ALIMENTAIRE

Le changement climatique se caractérise par la sécheresse, la chaleur excessive, la désertification et les phénomènes météorologiques extrêmes. Tous ces facteurs affectent également la biodiversité florale et entomologique. La vitesse du changement climatique dépasse la capacité des pollinisateurs à s'adapter aux nouvelles conditions, ce qui entraîne leur déclin ou leur extinction. En Europe, le changement climatique pourrait entraîner une diminution du nombre d'espèces de 27% à 42% avant 2080.⁴²⁴ La plupart des espèces sauvages risquent de voir leur aire de répartition géographique réduite de plus de 50% avant 2055.

Il est difficile d'estimer dans quelle mesure le changement climatique affectera les pollinisateurs : selon certaines recherches, entre 17% et 50% des espèces connaîtront des problèmes dus à la réduction de la disponibilité des fleurs causée par le changement climatique attendu.⁵⁸⁸ Certaines plantes, comme les céréales et les légumineuses, pourraient voir leur capacité à fournir des minéraux et des protéines importants sur le plan nutritionnel diminuer avec le changement climatique : zinc dans les céréales, fer et zinc dans les légumineuses. Par conséquent, certaines carences nutritionnelles risquent d'augmenter.

Il existe depuis longtemps des preuves, au moins pour certaines plantes, que l'augmentation des concentrations de dioxyde de carbone entraînera une réduction de la valeur protéique du pollen, l'aliment essentiel de nombreux pollinisateurs.²³⁹ Chez certaines fleurs, la sécheresse contribue à réduire la production de nectar (par exemple, dans les fleurs de lavande), tandis que les

précipitations provoquent une dilution du nectar (par exemple, dans les fleurs d'acacia), ce qui les rend moins attrayantes pour les abeilles.

On peut s'attendre à ce que l'augmentation de la quantité de dioxyde de carbone dans l'atmosphère et l'augmentation du rayonnement ultraviolet modifient considérablement la floraison et la quantité de nectar, au point d'affecter les chances de survie des insectes.³⁶¹

La pollinisation peut être effectuée par le vent, les insectes et/ou d'autres animaux. La pollinisation entomophile est un aspect crucial de la reproduction des plantes à fleurs (angiospermes). Malheureusement, en raison des activités humaines, tant les plantes que les pollinisateurs sont en voie d'extinction. Le changement climatique génère plusieurs effets négatifs tels que le décalage entre la floraison et la présence de pollinisateurs, réduisant la possibilité de pollinisation des fleurs et la possibilité d'alimentation des insectes. En raison de l'augmentation des températures de chaque degré centigrade, dans certaines régions de la planète comme les zones tempérées, les plantes commencent à fleurir au moins 4 jours (entre 2 et 6) plus tôt.⁵⁸⁸

L'augmentation, voire le doublement, des concentrations de dioxyde de carbone qui se produira avant la fin de ce siècle pourrait nuire à l'interaction entre les fleurs et les pollinisateurs. Aux États-Unis (Illinois), le changement climatique modifiera les interactions connues entre 429 plantes et 1.419 espèces d'insectes pollinisateurs (14.983 types d'interactions fleurs-insectes ont été examinés).⁵⁸⁸ Si les concentrations de dioxyde de carbone doublent, les températures moyennes dans cette région des États-Unis devraient augmenter de +5°C d'ici la fin du siècle. En raison de cette augmentation, les stades de floraison pourraient être avancés d'une à trois semaines, ce qui nuirait à 17% à 50% des pollinisateurs. La modification des périodes de floraison provoquée par le changement climatique peut donc avoir des effets très négatifs. Les insectes chercheront des fleurs lorsqu'il n'y en a pas ou trop peu pour assurer leur survie, et les plantes auront des difficultés à se reproduire. Dans ce cas, on peut parler de co-extinction. Cette simulation prévoit que le changement des phases phénologiques des plantes, généré par l'augmentation du dioxyde de carbone, entraînera une réduction significative et alarmante des espèces d'insectes et de plantes.⁵⁸⁸ De nombreux autres facteurs susceptibles de générer une pression négative supplémentaire, tels que la sécheresse, les événements climatiques extrêmes ou la propagation d'espèces exotiques, n'ont pas été pris en compte dans les prévisions. Bien que seul le décalage ou la réduction du temps de chevauchement entre les insectes pollinisateurs et les fleurs ait été pris en compte, les résultats sont alarmants. Cette prédiction soulève une question très importante : l'altération des interactions entre espèces pourrait être un facteur majeur d'extinctions massives, ce qui est très inquiétant et largement sous-estimé, car ces phénomènes sont mal compris. Les interactions dans les écosystèmes entre les plantes, les organismes du sol et les animaux sont largement méconnues, mais elles constituent un réseau d'équilibres très délicats et irremplaçables qui ne peuvent s'adapter à la vitesse des changements imposés par l'humanité.

Parmi les effets facilement prévisibles du changement climatique figure le déplacement vers le nord des habitats adaptés aux insectes pollinisateurs. L'aire de répartition de certains bourdons (*Bombus terrestris*) devrait se déplacer de 230 km vers le nord d'ici 2030 et de 550 km d'ici 2050.³⁶¹ Les conditions climatiques propices à la survie de nombreuses espèces évoluent beaucoup plus rapidement que la capacité d'adaptation et la capacité de déplacement (par exemple, pour les insectes).

L'utilisation de pesticides est responsable de la réduction de la biodiversité : d'au moins 42% des invertébrés en Europe ; l'utilisation de ces molécules augmente à l'échelle mondiale, en partie à cause du réchauffement climatique.²⁷⁷

Le changement climatique va générer des événements extrêmes, des sécheresses, des inondations et d'autres phénomènes qui affecteront la sécurité alimentaire et les pollinisateurs. Il y a 22.000 ans, le niveau des mers était probablement 120 m plus bas qu'aujourd'hui et il y a

8000 ans, il atteignait le niveau actuel. Les zones côtières à risque sur la planète en raison de la montée du niveau des océans occupent 2% de la surface, mais sont habitées par 13% de la population mondiale qui seront de futurs réfugiés climatiques (plusieurs centaines de millions de personnes).¹²⁹⁴

Entre 2008 et 2016, on estime que 25 millions de personnes par an ont été déplacées par des catastrophes environnementales.⁷⁷³ Les cinq premiers pays pour le nombre de personnes déplacées par des catastrophes environnementales sont la Chine (première place), l'Inde (troisième place) et les États-Unis (cinquième place).⁷⁷³ Les prévisions concernant les augmentations possibles du niveau des océans varient considérablement, mais indiquent que de petites augmentations de la température moyenne de la planète sont suivies de grandes variations dans la croissance de la hauteur des mers. Lorsque la Terre était complètement libre de glace, le niveau des océans était supérieur de plusieurs dizaines de mètres (peut-être 67 mètres) à ce qu'il est aujourd'hui. Si la température moyenne de la planète devait augmenter de plus de +4°C, comme cela pourrait se produire avant la fin du siècle si nous continuons à ne pas prendre ce problème au sérieux, certains scientifiques affirment qu'il n'y a aucune raison de douter que le niveau des océans pourrait augmenter de plusieurs mètres.⁷⁷⁴ L'eau salée entraînera une diminution des terres arables fertiles et une réduction de la quantité d'eau d'irrigation et d'eau potable. La sécurité alimentaire à proximité de la côte sera donc gravement compromise.

L'agriculture devrait contribuer à 24% des émissions totales de gaz altérant le climat, l'agriculture et l'élevage étant les sources les plus importantes de certains gaz altérant le climat, comme le méthane. En Europe, l'agriculture est responsable d'au moins 10% des émissions totales, mais le bétail est responsable de 38% des émissions de méthane et de 32% des émissions d'oxyde nitreux (N₂O).⁸⁷¹ Paradoxalement, l'agriculture est la principale source de certains gaz altérant le climat et l'un des secteurs les plus touchés par ces changements.

CHANGEMENT CLIMATIQUE ET ZOONOSES

D'une manière générale, on peut considérer qu'environ 60% des organismes pathogènes, qui portent atteinte à la santé humaine, sont des zoonoses, c'est-à-dire des organismes qui peuvent également affecter les animaux (probablement, pour les 40% restants, il n'existe pas de connaissances scientifiques adéquates).⁹³⁴ Si l'on exclut les zoonoses purement alimentaires, il existe plusieurs agents zoonotiques qui peuvent être transmis par les animaux d'élevage, soit directement (contact direct), soit indirectement (contamination de l'eau de boisson ou par les insectes). Le changement climatique favorisera également la propagation des zoonoses et de leurs vecteurs, tels que les moustiques porteurs du paludisme : dans les prochaines années, 200 millions de personnes supplémentaires pourraient contracter le paludisme, car la dégradation des écosystèmes naturels et le changement climatique favorisent les moustiques vecteurs.⁷³⁶

Certains insectes, comme ceux qui sont pathogènes pour les plantes ou les humains, sont favorisés par des hivers moins rigoureux et des périodes de chaleur plus longues : par exemple, le platyhelminthe qui génère la schistosomiase en Chine, le moustique *anophèle* qui transmet la malaria en Afrique et tue au moins 400.000 personnes chaque année, ou les tiques qui peuvent transmettre d'autres maladies. Le changement climatique favorise les insectes vecteurs de maladies dans de nouveaux territoires, comme cela s'est produit avec les épidémies de *chikungunya* en France et en Italie en 2007, 2010, 2014, 2015 et 2017.⁷⁹¹ Le paludisme est une maladie très dangereuse qui a été vaincue en Europe en 1975, mais le moustique qui la transmet (*l'anophèle*) est toujours présent. En fait, le genre *Anopheles* comprend au moins 460 espèces de moustiques, dont plus de 30 sont des vecteurs possibles du paludisme.¹⁰⁷³ Le changement climatique pourrait favoriser la propagation des moustiques en Europe (par exemple, le

moustique tigre en Europe du Nord) et avec eux les maladies qu'ils véhiculent. Au cours de ce siècle, le changement climatique risque d'exposer plusieurs centaines de millions de personnes à des maladies qui étaient autrefois reléguées dans les zones tropicales, touchant ainsi plus d'un milliard de personnes dans le monde. Dans le pire des scénarios climatiques, qui pourrait se produire vers 2080, l'Europe pourrait être parmi les régions les plus touchées.⁷⁹² Nous pouvons affirmer que dans le monde actuel, le climat présent avant l'ère industrielle aurait le potentiel d'empêcher l'apparition de maladies tropicales transmises par quelques moustiques à plus d'un milliard de personnes. Les mesures visant à prévenir le changement climatique pourraient empêcher la propagation de maladies potentiellement dangereuses dans une grande partie du monde industrialisé.

APPAUVRISSEMENT DE L'OZONE STRATOSPHERIQUE ET AUGMENTATION DE L'OZONE TROPOSPHERIQUE

L'ozone (O₃) est un gaz hautement réactif, doté d'un pouvoir oxydant considérable, d'une odeur piquante et d'une couleur bleue à forte concentration. L'ozone se trouve à la fois dans la haute atmosphère et dans l'air respirable, c'est-à-dire l'air en contact avec le sol. Si l'ozone stratosphérique, c'est-à-dire celui de la haute atmosphère, est utile, l'ozone troposphérique que nous pouvons respirer est nocif. L'ozone troposphérique réduit la croissance des plantes, est nocif pour les humains et s'est avéré nocif pour les animaux en laboratoire.⁹⁷⁸ Dans la stratosphère (entre 30 et 50 km au-dessus du sol), la présence d'ozone protège la surface de la terre des rayons ultraviolets émis par le soleil, qui sont nocifs pour la vie, y compris pour l'homme. L'absence de ce composé dans la stratosphère est généralement appelée "trou d'ozone". L'ozone qui nous protège du rayonnement solaire dû aux activités humaines a tendance à diminuer, tandis que l'ozone nocif (troposphérique) augmente. L'ozone est un puissant gaz à effet de serre : on estime que sa contribution au changement climatique à l'échelle planétaire est l'une des plus importantes avec celle du dioxyde de carbone et du méthane.

L'ozone près de la surface de la terre est mesuré par le réseau de surveillance de l'air et est un composant du "smog photochimique". Il survient principalement pendant les mois d'été, lorsque le rayonnement solaire est intense et les températures élevées. Il est formé, par exemple, par la photolyse du dioxyde d'azote. Les oxydes d'azote et les composés organiques volatils émis dans l'atmosphère par de nombreux processus subissent un système complexe de réactions photochimiques, induites par la lumière ultraviolette, conduisant à la formation d'ozone et de centaines d'autres substances très rares. Ces polluants secondaires sont appelés collectivement "smog photochimique", car ils sont produits par des réactions chimiques catalysées par la lumière. La concentration d'ozone mesurée au sol résulte d'un équilibre dynamique déterminé par de multiples facteurs, qui conduisent à sa production et à son élimination ; comme indiqué, la concentration augmente pendant les mois d'été et il existe une relation chimique entre la concentration d'ozone et celle des oxydes d'azote (d'autres molécules, telles que les composés organiques volatils non méthaniques, peuvent également favoriser la formation d'ozone troposphérique).

L'intensité accrue du rayonnement ultraviolet, qui atteint la surface de la terre en raison du trou dans la couche d'ozone (stratosphérique), augmente les risques pour la santé, en particulier pour les populations vivant aux latitudes moyennes et élevées, principalement en raison de l'exposition externe (le rayonnement solaire non protégé peut endommager la peau et les yeux). Sans le filtre d'ozone stratosphérique, la vie sur terre n'existerait probablement pas.⁸⁸⁹

L'ozone troposphérique réduit la fonction respiratoire, augmente la réactivité des bronches, provoque des brûlures oculaires et induit des événements inflammatoires dans les voies respiratoires supérieures (toux et difficultés respiratoires). L'augmentation des concentrations

d'ozone dans la partie de l'atmosphère proche du sol accroît l'incidence des maladies cardio-respiratoires, en particulier dans les zones urbaines.

L'ozone dans les couches inférieures de l'atmosphère (troposphère) favorise l'augmentation du dioxyde de carbone car il réduit les mécanismes normaux d'absorption des plantes, inhibe la photosynthèse chlorophyllienne, empêche le transport des nutriments des racines aux feuilles et accélère le vieillissement. Les concentrations d'ozone supérieures à 40 ppb posent des problèmes aux plantes. Cet ozone troposphérique résulte de réactions photochimiques entre l'oxygène et des précurseurs d'origine anthropique : méthane, monoxyde de carbone, composés organiques volatils, oxydes d'azote. On estime que l'augmentation de l'ozone troposphérique (prévue d'ici 2100) réduira la quantité de dioxyde de carbone absorbée par les plantes jusqu'à 140 Gt (1 Gt ou "Giga" tonne correspond à un milliard de tonnes).

L'ozone troposphérique est toxique pour les plantes et les humains, et tue au moins 150.000 personnes par an. Les pesticides affectent la qualité de l'air et peuvent endommager certains des mécanismes naturels de protection de l'atmosphère. Le bromure de méthyle est un pesticide utilisé dans la culture des tomates en serre (fumigant), pour désinfecter les céréales et les silos, et a été interdit par le protocole de Montréal en raison de ses effets négatifs sur la couche d'ozone.²⁸⁰

DÉTOURNER L'ATTENTION AVEC DES INFORMATIONS SCIENTIFIQUEMENT ET MORALEMENT INCORRECTES.

Parmi les solutions proposées mais improbables pour lutter contre le changement climatique, quelques-unes sortent du lot :

- Augmenter l'utilisation de l'énergie nucléaire (rapport IPPC 2018 p. 19).⁷⁷⁵ Il faut savoir que dans le bilan énergétique et économique de la vie d'une centrale nucléaire, qui ne dépasse généralement pas 60 ans, de nombreux postes sont sous-estimés, comme les déchets qui resteront mortels pendant des dizaines de milliers d'années et l'inexistence d'une méthode d'élimination sûre. Les coûts et les risques liés à la production d'armes mortelles sont également sous-estimés. Enfin, il ne faut pas oublier que les isotopes utilisés pour produire de l'énergie nucléaire sont des ressources limitées.
- Augmenter la superficie cultivée pour produire des agrocarburants et remplacer les combustibles fossiles ; mais sans combustibles fossiles, on n'obtient pas d'agrocarburants. Cette stratégie est folle parce que l'énergie consommée, en termes de combustibles fossiles utilisés, est supérieure à l'énergie obtenue (dans la biomasse utilisable pour la combustion ou la fermentation).⁷⁴¹ Pour mettre en œuvre cette stratégie, il faut affamer des millions de personnes. Supposer investir 150 millions d'hectares de terres cultivées sur la planète pour produire des agro-carburants et pouvoir nourrir 5 personnes par hectare avec la culture de cette surface signifie perdre la quantité de plantes qui pourraient nourrir environ 750 millions de personnes (cela représente 15 millions de kilomètres carrés, une surface une fois et demie plus grande que l'Europe ; ce sont des scénarios éthiquement inacceptables décrits dans le rapport IPPC 2018 p. 22).⁷⁷⁵
- Un message erroné mais de plus en plus exploité est que la géo-ingénierie va nous sauver. Parmi les travaux fantaisistes de géo-ingénierie proposés comme moyen de sauver la planète figure l'introduction d'éléments refroidissants dans l'atmosphère par le biais d'éruptions volcaniques artificielles. Une autre hypothèse consiste à introduire

d'énormes quantités de nutriments (par exemple, du minerai de fer) dans les océans pour favoriser la croissance du plancton, qui accumulera davantage de dioxyde de carbone. L'idée derrière ces propositions est de répartir les polluants dans l'espoir de réduire les effets négatifs d'autres polluants. Il s'agit de technologies qui n'existent pas à ce jour, il s'agit donc d'hypothèses fantaisistes et elles auront certainement des effets secondaires indésirables inacceptables, comme détourner l'attention de l'effondrement environnemental imminent, et gaspiller du temps et des ressources. Parmi les effets secondaires avérés, citons l'exemple du soufre qui serait distribué dans la haute atmosphère et pourrait endommager la couche d'ozone. ^{686, 774} Ces propositions servent à alimenter le doute et la croyance que la technologie va nous sauver. ^{846, 980} Ces projets ne sont pas réels et sont l'expression d'un délire d'omnipotence ou de folie chez un malade en phase terminale. Malheureusement, dans de nombreux rapports sur le climat et lors de certaines conférences, ces technologies, qui doivent encore être inventées (elles relèvent actuellement de la science-fiction), sont intégrées dans les estimations de l'atténuation du changement climatique comme s'il s'agissait d'applications existantes. ⁸⁴⁰ Une autre hypothèse de science-fiction, largement diffusée comme s'il s'agissait d'une technologie prête à l'emploi et durable, consiste à extraire de l'atmosphère les gaz qui altèrent le climat et à les aspirer sous terre où ils devraient être stockés pour toujours. Cela ressemble aux rêves de milliardaires mégalomanes et fous. Ces idées fantaisistes ne nous sauveront certainement pas, car il ne s'agit que de projets imaginaires. Il y a toutefois une inquiétude, et elle repose sur l'énorme inégalité en termes de moyens disponibles. Les milliardaires les plus riches de la planète disposent de ressources tellement énormes qu'ils peuvent décider d'essayer de réaliser des projets fous sans avoir besoin de l'aide des autres.

- Réduire les émissions de gaz à effet de serre provenant de l'élevage des animaux en modifiant la flore microbienne du tube digestif ou en sélectionnant de nouvelles (car elles n'existent pas aujourd'hui) qui pourraient peut-être générer moins de méthane.
- Réduire l'impact généré par les centaines de millions de voitures, de camions et d'avions en circulation en réduisant leur poids (de 10%, par exemple). ⁹⁸⁰

Il est choquant que des solutions inexistantes générant des retards dévastateurs soient diffusées dans le but de rassurer les ignorants. Il s'agit d'un exercice perturbateur qui repose sur un mélange de conflits d'intérêts, de fantasmes et d'ignorance, et qui propose des hypothèses inacceptables.

Dans la lutte contre le changement climatique, gagner lentement revient à perdre, il faut donc répandre la perception de l'urgence, contrairement à ce qui se passe souvent. Un grand danger est la situation financière dans laquelle les personnes les plus riches de la planète disposent d'une telle richesse économique qu'elles peuvent se permettre de mener des expériences à l'échelle mondiale sans aucune limite autre qu'économique.

Les propositions réalistes consistent à réduire la consommation (c'est le moyen durable le plus simple) et à éviter d'utiliser les combustibles fossiles. Des choix tels que :

- réduire la consommation d'aliments d'origine animale ;
- cultiver des plantes qui ne nécessitent pas d'irrigation ;
- réduire la production de déchets (par exemple, les déchets alimentaires) ;
- augmenter le recyclage (par exemple, métaux, déchets électroniques) ;
- la lutte contre l'obsolescence programmée (par exemple, les produits électroniques et les appareils ménagers) ;

- le remplacement des cultures annuelles par des cultures pluriannuelles (par exemple, des vergers et des arboretums au lieu de céréales pour l'alimentation) ;
- concevoir et diffuser une agriculture durable : sans pesticides, avec une moindre utilisation des combustibles fossiles, avec une plus grande biodiversité, sans application de pratiques nocives telles que le mouvement des sols et le brûlage des résidus végétaux ;
- réduire le transport privé et le transport de marchandises ;
- diminuer la production de plastiques de tous les métiers non nécessaires à la survie ;
- la sauvegarde de l'eau potable et l'interdiction de sa privatisation ;
- de ne pas utiliser les fonds publics pour encourager des activités non transparentes ou nuisibles à l'environnement, telles que la production de méthane à partir du maïs ;
- la reforestation de la planète ;
- obliger les entrepreneurs à divulguer des informations essentielles sur le niveau de protection environnementale et sociale fourni ;
- informer les consommateurs sur les méthodes de production et les ingrédients de manière beaucoup plus crédible (les ressources consacrées à la publicité pour les ingrédients absents sont un indicateur du manque de transparence et d'équité) ;
- augmenter les impôts des riches ;
- limiter la richesse maximale qu'un individu peut accumuler ;
- le démantèlement des paradis fiscaux ;

et d'autres choix qui peuvent être appliqués immédiatement et facilement mais qui sont impopulaires. Cette liste pourrait se poursuivre sur des dizaines de pages, mais le changement nécessaire le plus important est de reconnaître l'existence de limites et, par conséquent, d'accepter les interdictions, pour le bien de tous et des générations futures.

Malheureusement, des options visionnaires sont promues, comme l'application de technologies actuellement inexistantes qui pourraient peut-être un jour permettre d'extraire les gaz à effet de serre de l'atmosphère (rapport IPPC 2018 p. 15 et 17).⁷⁷⁵ Utiliser la science-fiction pour aborder des problèmes aussi proches et apocalyptiques est (pour le moins) naïf.

Une hypothèse plus concrète, facilement réalisable sans compromettre la santé, est celle du régime alimentaire : réduire la consommation de viande et de produits carnés par les riches de la planète. Un changement dans les habitudes alimentaires, vers un plus grand végétarisme, pourrait libérer une surface comprise entre 4 et 25 millions de kilomètres carrés : une surface environ 2,5 fois la taille de l'Europe entière.^{36, 776} Une autre bonne idée serait d'interdire la production d'agro-carburants (méthane et éthanol) et d'agro-plastiques, ce qui permettrait d'utiliser de grandes surfaces pour l'alimentation : jusqu'à 7% de la surface agricole actuellement utilisée en Europe et bien plus dans d'autres pays du monde.⁷⁴¹

Malheureusement, l'ensemble des propositions avancées est très décevant car elles sont insuffisantes pour générer le changement de cap nécessaire. Cela peut sembler exagéré, mais les informations scientifiques indiquent qu'il est très probable que le temps dont nous disposons pour nous sauver d'événements climatiques apocalyptiques n'est que de quelques années, voire moins de 20. Nous compromettons l'avenir de nos enfants alors que les mises à jour des prévisions relatives au changement climatique au cours des dernières décennies indiquent systématiquement une augmentation des effets dévastateurs. Pour contrer l'indifférence à l'égard du changement climatique, il faudra probablement une mobilisation de type guerrier, comme ce fut le cas pour l'urgence du coronavirus. Le réchauffement de la planète, la destruction de la biodiversité, la dégradation des sols et des océans et d'autres facteurs résultant de l'invasion humaine de tous les coins de la Terre feront certainement beaucoup plus de dégâts et encourageront davantage d'épidémies.

LUTTER CONTRE L'IGNORANCE ET LES INÉGALITÉS POUR PRÉSERVER L'ENVIRONNEMENT ET LA SANTÉ

Ces prédictions devraient nous effrayer et mettre en branle toutes les actions nécessaires. La fenêtre de temps dans laquelle cette dangereuse incertitude peut être abordée de manière positive est très courte et se réduit de plus en plus vite. Les pires prédictions d'une augmentation de +2°C pourraient se produire en moins d'une génération humaine. Le bon sens devrait nous amener à laisser les combustibles fossiles dans le sol, à reboiser la planète et à réduire le consumérisme. Revenir en arrière d'au moins 60 à 70 ans sur le mode de vie des pays industrialisés est la seule solution ; c'est précisément pour cela qu'elle nous fait peur. Obtenir pacifiquement une réduction immédiate de la liberté en échange d'avantages futurs, même si c'est dans un avenir proche, reste et restera probablement une utopie. Pourtant, la situation est pire en Italie, où la croissance de la température moyenne est deux fois plus élevée que la moyenne mondiale. Nous nous trouvons dans une zone qui est affectée par le changement climatique avec une intensité bien supérieure à la moyenne mondiale et, par conséquent, nous devrions être encore plus préoccupés : les températures minimales ont augmenté davantage et les températures hivernales davantage (nous avons enregistré une réduction des jours de gel et une augmentation des nuits tropicales) ; les précipitations totales ont diminué ainsi que le nombre total de jours de pluie.¹²⁹⁴ Les glaciers des Alpes ont diminué de moitié en un siècle et la vitesse du changement s'accélère. Dans la région méditerranéenne, certaines cultures, comme les cultures non irriguées, pourraient connaître une réduction des rendements allant jusqu'à 50% avant 2050 (par exemple, le maïs et le blé).⁷⁷⁶ Le climat change à un rythme tel que les villes européennes se déplacent d'environ 20 km par an (Londres pourrait bientôt avoir le climat de Barcelone) et, depuis 20 ans, le raisin est également cultivé en Finlande et en Suède.⁸⁷¹ Un indice intéressant tentant d'estimer le risque du changement climatique a été développé par *GermanWatch*.²⁰³

Les effets du changement climatique sont également très visibles en Italie :¹²⁹⁰

- la fonte des glaciers alpins (les températures moyennes dans les Alpes ont augmenté de plus de 2°C depuis 1864) et l'effondrement de parois rocheuses célèbres pour les exploits réalisés par les alpinistes (par exemple, le Cervin, le Mont Rose) ;

- des averses (dans certaines villes de Ligurie, il est tombé plus de pluie en quelques heures qu'en un an : 948 mm en moins de 24 heures à Bolzaneto, dans la province de Gênes, le 8/10/2021 et 740 mm en moins de 12 heures à Rossiglione, dans la province de Gênes, le 4/10/2021) ;

- le 13 novembre 2019, les hautes eaux de Venise ont dépassé 1,87 m (les marées supérieures à 1,1 m sont passées d'une ou deux fois par an, jusqu'au milieu du siècle dernier, à vingt-six en 2019 ; le 13 novembre 2019, un événement emblématique de notre incapacité à faire face à d'énormes problèmes dont les solutions rendent impopulaires ceux qui les proposent s'est produit, lorsque le bâtiment du Conseil régional de Vénétie a été inondé, deux minutes après que la majorité politique eut rejeté les mesures proposées pour lutter contre le changement climatique ; les représentants du peuple, entre autres, ont décidé de poursuivre la séance malgré l'alarme et le bruit des sirènes, et ont été contraints de fuir par des manœuvres risquées et audacieuses) ;

- En juillet 2019, des phénomènes météorologiques extrêmes tels que des grêlons de 14 cm sont tombés à Pescara ;

- Entre 1950 et 2015, au moins 348 tornades ont été enregistrées, faisant 69 morts et 753 blessés, et générant des coûts de plusieurs centaines de millions d'euros (le 8 juillet 2015 dans la province de Venise, une tornade se déplaçant à une vitesse d'environ 20 km/h a enregistré des vents allant jusqu'à 250 km/h ; en novembre 2012 dans les Pouilles, l'une des plus grandes tornades enregistrées en Europe s'est produite) ;

- l'agriculture subit de graves dommages (les fluctuations climatiques pourraient rendre de nombreuses zones viticoles italiennes impropres à cette culture dans quelques décennies) ;
- la mer Méditerranée est envahie par des espèces exotiques provenant, par exemple, de la mer Rouge et, en raison des changements (réchauffement, surpêche, pollution), de nombreuses espèces indigènes risquent de disparaître (par exemple, *Salpa salpa* ainsi qu'au moins 21% des 256 espèces de poissons endémiques d'ici la seconde moitié de ce siècle).

Nous vivons déjà une urgence climatique, même en Italie, et les prévisions sont catastrophiques.¹²⁸⁹ Nous poussons le chaos climatique dans une direction qui devient incontrôlable et nous risquons beaucoup si nous nous fions à notre capacité de prévision : les choses pourraient être bien pires. Par exemple, les informations sur la consommation d'oxygène et sa diminution à court et moyen terme sont insuffisantes. La combustion, la destruction des forêts, la dégradation de la vie dans les océans, la perte de fertilité des sols contribuent à réduire la concentration d'oxygène dans l'atmosphère. La vitesse de l'effondrement des services écosystémiques pourrait s'accélérer rapidement lorsque des seuils critiques sont franchis, comme la réduction de la biodiversité de plus de 50%. Ces questions, ainsi que d'autres questions environnementales, devraient être explorées plus énergiquement. En outre, la science, malgré d'innombrables cris d'alarme, n'a pas été en mesure de modifier les choix politiques et sociaux de manière significative.¹²⁸⁹ Un défi majeur consiste à assurer une bonne qualité de vie au plus grand nombre tout en respectant les limites planétaires, même en Italie. Certains choix clairvoyants comme la réduction des dépenses militaires et la lutte contre l'évasion fiscale permettraient probablement de récupérer des centaines de milliards d'euros qui pourraient être alloués à la transition écologique et à la décroissance maîtrisée. Le changement climatique sape les fondements de la vie sociale et, bien que la science n'ait plus de doutes, les négationnistes continuent de gaspiller des ressources et de retenir des opportunités irrémédiables ; soulignons le communiqué publié en 2019 qui porte les signatures de 500 personnalités qui nient l'existence d'une crise climatique (dont 165 signataires italiens).^{1291, 1292, 1293} C'est l'une des nombreuses campagnes orchestrées par des centaines de climato-sceptiques (professeurs, lobbyistes, politiciens) visant à bloquer tout engagement international pour construire une économie zéro carbone d'ici 2050 (en 2016, avec l'élection de Donald Trump, en quatre ans, au moins 176 lois et mesures ont été adoptées pour réduire les mesures de lutte contre le réchauffement climatique, y compris le retrait des États-Unis de l'accord de Paris sur le climat signé en 2015). Il faut éviter que ceux qui ont compris restent passifs ou, pire, rament dans la direction opposée pour des raisons égoïstes. Les comportements autodestructeurs doivent être fortement combattus.

La question environnementale est effectivement représentée par la question climatique, qui est un exemple frappant de la distorsion de l'ordre mondial qui prévaut : moins de dix des personnes les plus riches de la planète possèdent des ressources économiques supérieures à celles que possèdent la moitié des personnes les plus pauvres du monde ; 1% des habitants de la planète possèdent une richesse supérieure à celle du reste de la population mondiale. En conséquence, les 10% de personnes les plus riches génèrent plus de la moitié des émissions de gaz à effet de serre de la planète.⁷⁶² Le temps est venu de construire un ordre social qui crée des avantages pour tous et pas seulement pour quelques privilégiés. Les modèles économiques dominants sont fondés sur l'expression de caractéristiques humaines très négatives telles que l'égoïsme et ne laissent aucune place au civisme et à l'empathie. Notre ignorance de la crise environnementale est devenue un atout économique majeur pour certains. L'ignorance de l'écologie et des principes fondamentaux de la physique, de la chimie et de la biologie est une condition préalable au mythe de la croissance économique infinie et de l'exploitation sans limites de la nature, et constitue donc une véritable monnaie d'échange : plus on la cultive, plus les chances de profit sont grandes. Cependant, cette politique se heurte aux limites biophysiques qui ne permettent pas à la Terre de supporter une pression humaine croissante.

Les énergies fossiles sont des ressources limitées et avant que nous ayons consommé la dernière goutte de pétrole, la biosphère aura été gravement et irréversiblement altérée. Nous avons probablement déjà consommé plus de la moitié des réserves de pétrole connues. Les indicateurs qui montrent que le pétrole va bientôt s'épuiser sont les suivants :

- le rapport entre l'énergie utilisée pour obtenir plus d'énergie (EROEI : *Energy Returned on Energy Invested*) ;
- la quantité de nouveau pétrole découvert par rapport à celui extrait.

Entre 1940 et 1984, le rapport entre l'énergie investie et l'énergie obtenue est passé de 1 :100 à 1 :8. En 2011, de nouveaux champs ont été découverts, représentant un tiers des quantités extraites cette année-là. Ces deux indicateurs sont suffisants pour prédire que le pétrole bon marché va s'épuiser.

Le changement climatique entraînera une augmentation des décès et des maladies dus à divers facteurs tels que la malnutrition, le paludisme, la diarrhée, les troubles mentaux, les vagues de chaleur, les inondations, les ouragans, les incendies et les guerres. Les effets du changement climatique sont très incertains : par exemple, le nombre de réfugiés climatiques en 2050 pourrait se situer entre 25 millions et même 1 milliard. Un tel éventail souligne à la fois l'incertitude et le danger. Le coût réel de l'inaction pourrait être beaucoup plus élevé que ce que nous pouvons prévoir. Si les engagements internationaux volontaires promus jusqu'à présent sont respectés, le réchauffement dépassera +3°C (probabilité de 90% de dépasser 2°C). Il convient de remarquer que les modèles climatiques envisagent la possibilité que la température augmente de plus de 5°C avant la fin de ce siècle. Il n'y a pas de certitude scientifique sans équivoque que si les 450 ppm de dioxyde de carbone dans l'atmosphère ne sont pas dépassés, il n'y aura pas d'augmentation de 2°C et le changement climatique ne sera pas dangereux (en mars 2021, la concentration était de 417 ppm alors qu'en 1750 elle était d'environ 277 ppm).⁶⁸⁰ Néanmoins, lors des conférences internationales sur le climat, une augmentation inférieure à +2°C est souvent considérée comme un seuil de sécurité, alors qu'elle est en fait le résultat d'un compromis politique plutôt que d'une certitude scientifique. Il aurait été beaucoup plus pratique de fixer des objectifs en termes de quantité d'émissions de gaz altérant le climat à ne pas dépasser. Le compromis politique accepte la possibilité que les récifs coralliens s'éteignent, que des centaines de millions de personnes deviennent des réfugiés climatiques ou soient déplacées par des catastrophes environnementales, et admet d'autres événements qui devraient être catastrophiques.

DÉGRADATION IRRÉVERSIBLE DES SOLS

LE SOL EST UNE RESSOURCE PRÉCIEUSE ET NON RENOUELABLE

Le sol est le résultat d'un processus long et difficile de formation par la désintégration des roches et d'autres processus (pédogenèse) qui prend entre 1.000 et 100.000 ans.¹⁴⁷ Malheureusement, le taux d'érosion et de dégradation dépasse largement la capacité naturelle de régénération, de sorte que le sol ne peut être considéré comme une ressource renouvelable. En général, on estime que la perte de la couche arable se fait à un rythme 17 fois supérieur à celui de la régénération naturelle en Europe, 10 fois aux États-Unis et 47 fois en Chine.⁸ Au moins un tiers des terres arables du monde ont été perdues au cours des 40 dernières années en raison de la dégradation des sols. Sur les terres restantes, 40% sont menacées (au moins 50% en Europe).⁹⁸⁵ La dégradation des sols se poursuit à un rythme insoutenable, c'est-à-dire plus rapidement que la capacité de régénération naturelle : nous avons dépassé la limite de la durabilité. Les services écosystémiques ne peuvent pas suivre la vitesse du changement que nous avons imposé. Le temps qu'il faut pour former ces quelques centimètres fertiles dont dépend notre survie doit nous faire réfléchir sur leur préciosité et sur le fait que, par rapport à l'horizon temporel de l'espèce humaine, le sol n'est pas une ressource renouvelable. Nous ne pouvons plus ignorer cette alarme.

Un sol fertile contient environ 100 t de matière organique par hectare.⁴²⁵ La quantité de composés organiques carbonés, dans le premier mètre de profondeur, varie entre 30 t/ha, dans un sol au climat aride, et 800 t/ha. La plupart des sols ont entre 50 et 150 t/ha.⁴⁹ Un sol avec moins de 70 t/ha de carbone organique est considéré comme peu fertile.⁸⁴ L'agriculture intensive appauvrit les sols en substances organiques telles que les composés de carbone.⁴⁹

Le cycle du carbone présente un équilibre délicat qui est de plus en plus altéré par l'intervention humaine, en faveur du rejet des sols et des forêts dans l'atmosphère. On estime que dans certaines régions de la planète (par exemple aux États-Unis), au moins 50% du dioxyde de carbone présent dans les sols a été transféré dans l'atmosphère en moins de 100 ans en raison de la déforestation (par exemple pour le pâturage), de l'érosion et des cultures. Le labourage est l'une des pratiques agricoles qui contribue à libérer du dioxyde de carbone dans l'atmosphère : les charrues tirées par des bœufs sont représentées dans des hiéroglyphes égyptiens datant de 3000 avant J.-C..⁹⁸⁵

L'agriculture industrielle réduit la fertilité des sols ; dans certaines régions italiennes, plus de 70% des sols agricoles ont un niveau de fertilité inférieur aux valeurs minimales pour une bonne production agricole : au moins 2% de matière organique provenant d'êtres vivants.

Un exemple de dégradation évitable des sols est la culture de plantes pour produire des agrocarburants tels que le méthane et l'éthanol. Les problèmes causés par la culture pour la production d'agrocarburants sont multiples :¹²⁴⁶

- la concurrence avec la chaîne alimentaire ;
- l'augmentation des impacts sociaux négatifs, comme dans la culture des palmiers à huile en Nouvelle-Guinée, où les travailleurs sont souvent sous-payés, exploités, maintenus dans des conditions peu enviables et où les cultures locales disparaissent ;
- les déchets sont générés qui polluent l'environnement et nuisent à la santé.

En revanche, la zone pourrait être utilisée pour la reforestation, la renaturalisation des écosystèmes avec des avantages considérables pour le climat et le sol. En particulier dans les zones les plus industrialisées de la planète, nous prélevons la majeure partie de la biomasse

disponible. Espérer répondre aux besoins énergétiques en prélevant davantage de biomasse revient donc à endommager davantage les zones naturelles : les problèmes tels que la dégradation des sols, le changement climatique et la réduction de la biodiversité s'accroîtront.

À l'échelle mondiale, une zone au moins 15 fois plus grande que l'Italie est dégradée chaque année par la déforestation, les incendies, l'augmentation de la salinité et l'urbanisation, et au moins un quart de la surface de la terre est menacée par la désertification. En Italie, au moins 21% de la surface est menacée de désertification ; ce pourcentage peut être beaucoup plus élevé dans les régions du sud.⁹⁸⁵ Malheureusement, la dégradation des sols et la baisse de productivité qui en résulte sont irréversibles, car elles se produisent plus rapidement que la capacité de régénération des sols dans des conditions naturelles. La moitié environ des sols sont déjà touchés par des phénomènes de réduction de la fertilité et plus de 30% des sols cultivés perdent leur statut de terre arable avant de pouvoir se régénérer.¹⁵ La gestion des sols doit donc être renouvelée en fonction de critères de durabilité et de régénération. Il faut garder à l'esprit que la demande de denrées alimentaires pourrait doubler avant 2050 et que pour soutenir l'augmentation de la production alimentaire, la fertilité des sols doit être accrue. Malheureusement, on constate une augmentation de la dégradation des sols, ce qui va à l'encontre de ce qui est nécessaire pour soutenir la demande alimentaire mondiale. Comment espérer, comme le souhaite la Banque mondiale, augmenter la production alimentaire de 70% d'ici 2050 dans ces conditions ? Il faut probablement être un expert en économie et en finance pour croire à une croissance infinie de, disons, 2% du PIB : cela signifierait qu'il faudrait doubler la richesse et la production tous les 30 ans environ.

En général, les sols agricoles sont moins fertiles que ceux des écosystèmes naturels et contiennent entre 25 et 75% de carbone en moins. Le manque de fertilité est compensé de manière non durable par l'utilisation de produits chimiques (pesticides et engrais) et d'énergie : au moins 10 kcal d'énergie fossile pour chaque kcal de plante.

Chaque année, entre deux et douze millions d'hectares de sols sont dégradés de manière irréversible et deviennent inutilisables à des fins agricoles en raison de divers facteurs tels que l'érosion, la salinisation, la désertification, la sécheresse, les inondations, la baisse de fertilité, l'urbanisation et la pollution. Face à la demande d'augmentation de la production alimentaire, qui devrait même doubler au cours des 30 prochaines années, la réalité est que la capacité de la planète à soutenir l'approvisionnement alimentaire se réduit à un rythme alarmant. À ce rythme, dans 30 ans, au moins 60 à 90 millions d'hectares deviendront impropres à la culture : il s'agit d'une estimation optimiste, car ils pourraient être beaucoup plus nombreux.⁷⁴⁰ À titre de comparaison, 173 millions d'hectares, soit 39% de la superficie totale des terres, étaient cultivés en Europe en 2016.⁷³⁹ Dans le monde, la surface terrestre occupe environ 15 milliards d'hectares, tandis que la surface agricole utilisée (SAU) représente un tiers du total, soit environ 5 milliards d'hectares :⁷⁴⁰

- a. 3,4 milliards d'hectares de pâturages (y compris les pâturages alpins) ;
- b. 1,4 milliard d'hectares de terres arables ;
- c. 140 millions d'hectares de cultures permanentes (vergers, palmeraies, vignobles, plantations de thé ou de café).

La superficie des terres arables, depuis les années 1970, malgré la mise en culture de vastes zones forestières au Brésil, en Afrique et en Indonésie (des millions d'hectares par an pris à la nature), est restée presque constante en raison des pertes générées par divers facteurs tels que la salinisation des zones irriguées, l'appauvrissement des terres agricoles et l'avancée de l'urbanisation.

Les prévisions en matière d'insécurité alimentaire pourraient être optimistes car il existe de nombreux facteurs incertains, tels qu'une réduction drastique de la biodiversité comme les pollinisateurs. Une diminution du service fourni par les insectes pollinisateurs pourrait à elle seule entraîner une réduction de 10% du volume des produits végétaux, notamment des cultures

à revenu plus élevé et de meilleure valeur nutritionnelle (teneur en vitamines, par exemple). Les effets tels que ceux du changement climatique doivent également être pris en compte, car de très grandes zones peuvent devenir impropres à la culture. D'autres pressions négatives sont générées par l'occupation des terres agricoles pour satisfaire des règles économiques égoïstes, comme la production d'agrocarburants.⁷⁴¹ L'augmentation prévisible des maladies des plantes (par exemple, les insectes phytophages tels que les criquets, qui sont favorisés par le changement climatique et d'autres facteurs anthropiques) peut également aggraver la situation actuelle.⁷⁴²

Une autre utilisation des terres qui devrait être limitée est la culture d'au moins 3 à 4 millions d'hectares pour produire le tabac nécessaire pour subvenir aux besoins de plus de 1,1 milliard de fumeurs. Il faut savoir que nous ne pouvons pas encore nous permettre de gaspiller les terres, car les terres arables disponibles pour chaque être humain se situent aujourd'hui entre 1.000 et 3.000 mètres carrés et sont appelées à diminuer. Les personnes vivant dans une situation dangereuse d'insécurité alimentaire sont nombreuses, même dans les pays les plus riches : pour un Américain sur sept, la sécurité alimentaire n'est pas un acquis, ce n'est donc pas un droit garanti à tous mais le privilège de quelques-uns.⁸³⁷

Les stress biotiques (par exemple, la diminution des micro-organismes et des invertébrés dans le sol, les parasites) et les stress abiotiques (par exemple, la sécheresse, la salinité, l'accumulation de polluants, la chaleur) contribuent à la réduction de la fertilité des sols sur toute la planète.¹²⁴² La perte de la biodiversité dans les sols est l'un des problèmes les plus importants, car elle entraîne une diminution de la capacité à produire des aliments et à maintenir les plantes. De nombreux micro-organismes sont bénéfiques aux plantes en augmentant leur fertilité, en facilitant l'absorption des nutriments et en améliorant leur santé. Par exemple, certains micro-organismes présents dans le sol contribuent à rendre les plantes plus résistantes à la sécheresse dans le maïs (*Azospirillum lipoferum* et *Bacillus* Spp.), le soja (*Pseudomonas putida*), le blé (*Bacillus amyloliquefaciens*, *Azospirillum brasilense*, *Rhizobium leguminosarum*, *Mesorhizobium ciceri* et *Rhizobium phaseoli*) et le riz (*Trichoderma harzianum*).¹²⁴² Les mécanismes par lesquels la résistance à la sécheresse est conférée sont divers, tels que la production de polysaccharides et l'activation d'activités métaboliques, tandis que la tolérance à la salinité peut être générée par la production d'hormones. Ainsi, les micro-organismes participant à la formation de symbioses racinaires (mycorhizes) peuvent conférer une résistance à la fois à la sécheresse et à la salinité (par exemple, dans le cas de la laitue et de la tomate).¹²⁴² Dans de nombreuses régions de la planète, les sols sont tellement dégradés qu'il faut en restaurer la fertilité en augmentant la quantité de matière organique et en inoculant des micro-organismes utiles aux plantes et aux écosystèmes sains. La fertilisation avec les organismes nécessaires à la restauration des sols sera une pratique de plus en plus nécessaire, mais elle aura peu d'effet si nous continuons à mettre en œuvre des pratiques de gestion agronomique non durables telles que le labourage, les pesticides, la fertilisation chimique, les sols non recouverts de végétation toute l'année et l'irrigation.

LE BÉTAIL, LES ENGRAIS ET LES SOLS

La distribution d'effluents d'élevage aux usines d'aliments pour animaux est un excellent moyen de recycler cette matière et, en même temps, de réduire l'utilisation d'engrais chimiques. Le fumier contient de l'azote sous forme organique et inorganique. La forme organique n'est généralement pas disponible pour l'absorption par les plantes jusqu'à ce qu'elle soit transformée en formes plus facilement assimilables, comme l'ammoniac (NH₄⁺). Une fraction de l'ammoniac est transformée par des micro-organismes en nitrates qui sont utiles aux plantes, mais qui peuvent en même temps facilement contaminer l'eau : entre 15% et 55% de l'azote distribué

dans le champ est perdu dans l'eau. L'épandage du fumier en profondeur (45 cm), comparé à l'épandage avec injection à 15 cm, augmente la quantité d'azote retenue par le sol mais coûte plus d'énergie.⁹⁰⁷

Les plantes se comportent différemment : certaines espèces sont plus dépendantes de l'azote inorganique (comme le maïs), d'autres sont capables d'absorber des formes organiques comme les acides aminés et les protéines. Les plantes telles que le riz, le sorgho et les carottes, bien qu'elles préfèrent absorber l'azote inorganique, sont capables d'absorber des formes organiques telles que les protéines, ce qui peut constituer un avantage.⁹⁰⁶ Le nitrate est généralement considéré comme la forme d'azote la plus facilement absorbée par les plantes. Les plantes vivant à basse température et dans des sols acides sont plus dépendantes de l'ammoniac que du nitrate. Ne pas prêter attention aux bonnes règles agronomiques revient à distribuer des polluants à l'environnement plutôt qu'aux plantes. A titre d'exemple, l'alternance de culture avec des légumineuses (ex : céréales en été et légumineuses en hiver) peut générer une augmentation de production équivalente à celle que l'on peut obtenir avec la distribution de 15-200 kg d'azote par ha et par an, selon les plantes utilisées et les conditions de culture.⁵²

La grande disponibilité de la matière organique à utiliser comme engrais est un aspect très positif si l'exploitation est située à proximité de sols pauvres en matière organique. On peut considérer que chaque jour, une vache, un porc ou un poulet produit une quantité de lisier égale à 10% de son poids corporel, avec une teneur en eau de 95% pour les porcs, 92% pour les bovins et 85% pour les volailles. Le lisier peut contenir de plus grandes quantités d'urine que le fumier. Les porcs produisent 7.300 litres de lisier par animal et par an, les bovins peuvent produire 18.000 litres par an, les poules pondeuses produisent 55 kg et les dindes 183 kg de fumier. La quantité d'eau bue quotidiennement est très variable ; par exemple, une vache laitière peut boire environ 200 litres d'eau par jour, une vache d'engraissement 50 litres, un porc 20 litres.

Malgré la grande disponibilité de substances organiques telles que le fumier, de grandes quantités d'engrais chimiques continuent d'être produites et utilisées. On estime que la production d'engrais azotés dans le monde entier consomme 1% de toute l'énergie utilisée par l'homme (5% de tout le gaz naturel consommé : entre 33 et 44 GJ par tonne d'ammoniac) et produit au moins 41 millions de tonnes de dioxyde de carbone par an. Le procédé Haber-Bosch, qui transforme l'azote diatomique atmosphérique en engrais minéraux, produit environ 100 millions de tonnes d'engrais azotés par an.¹¹⁴ On estime qu'au moins 40% de la population mondiale dépend de l'utilisation d'engrais azotés synthétiques.⁹¹⁹

Les nitrates sont l'un des plus importants contaminants chimiques des masses d'eau de la planète.⁸⁸⁴ La présence de composés azotés dans l'eau, tels que le nitrate et l'ammoniac, indique une éventuelle contamination microbiologique par du fumier ou des boues ou des eaux usées provenant de stations d'épuration. Le degré de dégradation de la ressource en eau est évalué sur la base de la concentration en nitrates. Pour les eaux souterraines, la valeur seuil a été fixée à 50 mg/L ; dans certains cas, la limite plus prudente de 40 mg/L est également utilisée. La contrainte la plus importante pour l'activité agricole résultant de l'application de cette législation est l'imposition d'une limite annuelle maximale à l'apport d'azote provenant du bétail pour la fertilisation des cultures. Cette limite a été fixée à 170 kg d'azote par hectare dans les zones considérées comme vulnérables aux nitrates (en Italie). Dans les zones non soumises à ces contraintes, la limite est de 340 kg d'azote par hectare et par an.

Dans la région du Piémont, on compte environ 14.00.000 d'animaux tels que des bovins, des volailles et des porcs, qui sont principalement élevés dans la plaine. La surface agricole utilisée est d'environ 900.000 hectares.⁹⁷¹ Par conséquent, la probabilité de contamination des eaux souterraines à la suite de la fertilisation avec des effluents d'élevage est élevée. Globalement, au moins 38% des eaux surveillées dans la zone agricole du Piémont ont déjà été reconnues comme contaminées par des substances provenant également du bétail, telles que les

composés azotés (directive sur les nitrates et zones vulnérables ; directive 91/676/CEE et décret législatif n° 152 du 11 mai 1999). Si l'on ne considère que la plaine, le pourcentage est bien supérieur à 38%. Posons les hypothèses suivantes, en simplifiant la situation du Piémont : ⁷⁴¹

- plus de 55% de la surface agricole utile peut être fertilisée régulièrement (500.000 ha sur un total de 900.000 ha) ;
- Les exploitations d'élevage sont réparties uniformément sur la surface agricole utile, de sorte que le transport du fumier ne constitue pas une limitation (hypothèse très optimiste) ;

tous les 10.000 mètres carrés, il est possible de disposer du fumier de 2 bovins, 3 porcs, 22 poulets ; en outre, 700 kg de compost provenant des déchets solides municipaux (c'est-à-dire la fraction organique produite par 3 et jusqu'à 5 personnes en un an) et jusqu'à 200 kg de boues, obtenues à partir de l'épuration des eaux usées, sont disponibles. Les engrais chimiques et les digestats issus de la fermentation anaérobie, qui utilisent également des cultures telles que le maïs pour produire du méthane (biogaz), sont également potentiellement disponibles sur chaque hectare. En détail, dans le Piémont, plus de 240 kg d'engrais minéraux sont utilisés par hectare, mais si l'on considère qu'ils sont distribués sur seulement 50% de la surface agricole utile (SAU), ce sont encore plus de 450 kg/ha/an qui seront distribués. Les déchets spéciaux, c'est-à-dire les déchets organiques provenant des activités de production et utilisés pour l'épandage dans l'agriculture ou pour la récupération de l'environnement, constituent un autre type d'engrais utilisé dans l'agriculture. Théoriquement, en supposant que ce matériel puisse être réparti uniformément sur 500.000 ha de terres agricoles, cela équivaldrait à épandre environ 2.000 kg de déchets spéciaux par ha et par an (soit une moyenne de 1.000 kg/ha de déchets spéciaux répartis chaque année sur l'ensemble de la zone agricole utilisée du Piémont). À ces polluants s'en ajoutent d'autres, comme plusieurs kilos de pesticides par hectare chaque année.

Si nous essayons d'appliquer le même raisonnement que nous venons d'effectuer sur le Piémont à l'ensemble de la plaine du Pô, il est facile de voir que les effluents d'élevage dépassent à eux seuls la capacité des sols agricoles à les recevoir, en ne considérant que les composés azotés et uniquement ceux qui proviennent des effluents d'élevage. Il existe une disponibilité excessive et concentrée de substances organiques dans quelques zones géographiques, ce qui devient alors un problème environnemental. On ne peut plus parler de fertilisation mais plutôt de répartition des déchets organiques sur le sol. La disponibilité dépasse les besoins des cultures. La surface agricole utilisable tant pour la production d'aliments pour animaux (par exemple le maïs) que, en général, pour l'épandage des effluents d'élevage, dans la plupart des territoires de la vallée du Pô, n'est pas suffisante pour assurer l'épandage de la matière organique disponible (fumier, compost, boues d'épuration, digestats obtenus par fermentation anaérobie) sans compromettre l'état sanitaire de l'environnement et des eaux. Les sols agricoles sont utilisés pour éliminer les polluants organiques excédentaires.

LA FERTILISATION ET L'APPORT DE MÉTAUX

Les métaux qui contaminent les sols agricoles peuvent provenir des engrais, des pesticides, des eaux polluées, de l'atmosphère (des combustibles fossiles), de la corrosion des équipements agricoles, des additifs alimentaires et des médicaments utilisés dans l'élevage, ou encore des boues issues du traitement des eaux usées. Les feux de forêt libèrent de grandes quantités de métaux, de dioxines et de furanes dans l'air et dans le sol. Les fongicides contenant du cuivre, du zinc, du manganèse et de l'étain sont utilisés en viticulture, en arboriculture et en horticulture (jusqu'à plusieurs kilos par hectare et par an).

La pollution atmosphérique est une source importante de certains contaminants dans le sol et dans la chaîne alimentaire. Pour certains métaux comme le plomb, le dépôt atmosphérique

est une source majeure. Plus d'un kilogramme de métaux lourds peut être déposé par hectare et par an en raison de la pollution atmosphérique : 100 mg par mètre carré et par an. Une méthode indirecte d'évaluation de la quantité de métaux provenant de l'atmosphère qui pénètre dans le système agricole consiste à mesurer la concentration dans les organismes bio-indicateurs tels que la mousse, le lichen ou les feuilles, par exemple de chêne, de peuplier et de pin.

Le fumier contient des concentrations élevées de métaux (cadmium, mercure, chrome et nickel), de sels et de micro-organismes. L'épandage du fumier et des boues (ou de leurs digestats) présente plusieurs problèmes, comme la présence de substances dangereuses. Les métaux sont également introduits dans le sol par la fertilisation inorganique avec des engrais chimiques phosphorés et azotés. Les métaux lourds sont appelés ainsi car ils ont un poids spécifique supérieur à 5 g/cm³ et sont, par exemple, l'arsenic, le cadmium, le mercure et le plomb. Ces métaux peuvent persister dans l'environnement et avoir des effets négatifs sur les plantes et les animaux. Les métaux peuvent rester dans les sols pendant des milliers d'années et se présentent sous forme d'oxydes, de sulfites, de sels ou de carbonates. Ils sont connus pour leur bioaccumulation dans la chaîne alimentaire. Certains métaux, comme le mercure et l'arsenic, sont volatils. Le mercure peut être émis par les feuilles de certaines plantes qui l'ont concentré, il est donc très mobile.

Certains métaux sont toxiques pour les humains, les animaux et les plantes (par exemple le cadmium, le plomb), d'autres sont essentiels en petites quantités pour les plantes et les humains (par exemple le cuivre et le zinc), d'autres encore ont des effets négatifs principalement sur certaines plantes (par exemple le chrome). Certains métaux à faible concentration sont essentiels pour les plantes (bore, zinc, cuivre, nickel), mais à des concentrations plus élevées, ils deviennent phytotoxiques. Le cadmium, le nickel, l'arsenic et le plomb ont divers effets néfastes sur l'homme et sont également cancérigènes. Le cadmium peut être absent du corps humain à la naissance, mais avec l'âge, il s'accumule, notamment dans les reins et le foie, et peut dépasser 30 mg à l'âge de 50 ans.⁹⁰⁹

Les aliments pour animaux peuvent contenir des métaux tels que le cuivre, le zinc, le sélénium, le cobalt, l'arsenic, le fer et le manganèse, qui sont donnés au bétail pour des raisons de santé et comme facteurs de croissance. Le cuivre et le zinc favorisent les réactions enzymatiques et sont donc parfois ajoutés à l'alimentation des animaux de ferme, tout comme le fer et le manganèse ; ils sont classés parmi les micronutriments, c'est-à-dire qu'ils sont nécessaires en petites quantités. Seuls 5 à 15% des métaux ingérés sont absorbés par les animaux, la majorité étant excrétée dans les fèces.

Certains des problèmes qui peuvent découler de la répartition des métaux dans l'environnement sont les suivants :

- Accumulation dans le sol de contaminants ayant des effets phytotoxiques (par exemple, le zinc) et des effets nocifs sur les organismes du sol (par exemple, le plomb, le mercure et le cadmium).
- Ingestion par les herbivores.
- Bioaccumulation des polluants dans les organismes végétaux et animaux, avec des risques pour la chaîne alimentaire. Les métaux tels que le cuivre, le zinc et le plomb peuvent être bioconcentrés dans des plantes telles que le blé.^{910, 911} Les graines de blé peuvent concentrer le cadmium et le cuivre. Les épinards, les légumes à feuilles et les cultures fourragères accumulent le cadmium. Le maïs a tendance à bioconcentrer facilement divers métaux tels que le manganèse, le zinc et le cadmium.⁹¹¹ Le maïs absorbe 5% de la concentration de cadmium dans le sol, s'accumulant jusqu'à 79 ppm, 14 ans après la dernière utilisation du compost.^{912, 913} Dans les plantes destinées à l'alimentation animale, une concentration de 0,5 mg/kg de cadmium est considérée comme sûre. Une fois ingéré par l'homme, le cadmium peut réduire sa concentration de

moitié en 10 à 30 ans. Il reste donc longtemps dans l'organisme, s'accumulant préférentiellement dans certains tissus : foie, reins et appareil reproducteur.

- Contamination de l'eau.

Le lisier de bovins peut présenter des concentrations de métaux plus élevées que le compost dérivé de la fraction organique des déchets solides municipaux (OFMSW). Par exemple, le zinc peut être trouvé dans des concentrations jusqu'à trois fois supérieures à celles autorisées pour les engrais en Italie.

La seule distribution d'effluents d'élevage, dans une quantité qui apporte 250 kg d'azote par hectare et par an, génère une augmentation de la concentration de certains métaux dans le sol.⁹¹⁴ En particulier, en distribuant une quantité de fumier de bovins laitiers correspondant à 250 kg d'azote par an, on distribue également (pour 10.000 mètres carrés) : 1.816 g de zinc, 431 g de chrome, 305 g de cuivre, 109 g de plomb, 3 g de cadmium, 0,4 g d'arsenic et 0,3 g de mercure. Ainsi, la pollution des sols et des eaux et la bioaccumulation dans la chaîne alimentaire sont favorisées.

Les matrices hautement contaminées, utilisées comme engrais, sont les boues issues du traitement des eaux usées et le compost issu de la fermentation aérobie des déchets solides municipaux. Des études à long terme ont montré qu'après l'épandage de compost, la quantité de matière organique provenant du compost est réduite de moitié dans le sol pendant au moins dix ans, mais que les concentrations de métaux augmentent par rapport à ce qu'elles étaient avant l'épandage.

Aux Pays-Bas, 30 ans d'utilisation du compost ont entraîné une augmentation des concentrations de métaux dans le sol, tels que le cadmium (par un facteur de 3), l'arsenic, le chrome, le nickel (par un facteur de 4), le mercure et le plomb (par un facteur de 4). Dans les plantes cultivées, ces métaux ont été trouvés à des concentrations plus élevées : de 15% à 50% (bioaccumulation à partir du sol). Les animaux qui mangent ces légumes peuvent les bioconcentrer davantage. Par exemple, le cadmium et le plomb se retrouvent en plus forte concentration dans les abats de porc (bioaccumulation à partir des plantes).

Dans les boues d'épuration, les concentrations de micro-organismes et de substances indésirables potentiellement dangereuses sont beaucoup plus élevées que dans les effluents d'élevage. Par exemple, les concentrations de bactéries telles que *Escherichia coli* peuvent être 100 à 10.000 fois plus élevées, et les concentrations maximales de métaux 30 fois plus élevées. En raison des concentrations élevées d'agents pathogènes et de substances potentiellement dangereuses (métaux lourds, par exemple), il serait souhaitable de réduire l'utilisation des boues et des dérivés de boues en agriculture, qu'il s'agisse de celles utilisées telles quelles ou de celles issues de la fermentation aérobie et anaérobie.

Les boues d'épuration contiennent également des polluants organiques tels que des perturbateurs endocriniens, des médicaments (par exemple, des antibiotiques, le *diazépam*, un tranquillisant, dont la concentration est réduite jusqu'à 50%) et d'autres produits (par exemple, des produits de nettoyage). Il existe également d'autres matières utilisées pour la fabrication des engrais, comme les résidus agro-industriels, les boues industrielles, les déchets de l'industrie des conserves, les grignons d'olive et les eaux végétales des moulins à huile, les résidus d'abattoirs, les résidus de l'industrie du cuir : tous sont des sources potentielles de différents types de polluants.

Pour une même concentration d'azote, les différents engrais contiennent des quantités de métaux différentes, qui peuvent varier d'un facteur 10 ou plus. Les métaux jouent un rôle important dans la rupture des équilibres qui régulent la fertilité des sols, car ils peuvent réduire l'activité et la biomasse des micro-organismes. Plusieurs travaux scientifiques ont démontré l'inhibition de la croissance des micro-organismes lors de l'utilisation d'engrais riches en métaux et fortement dosés, comme les boues d'épuration. Les plans de fertilisation doivent donc également tenir compte de ces apports. Malheureusement, jusqu'à présent, les apports d'azote ont été utilisés presque exclusivement pour les bilans de fertilisation. Cette approche limite

considérablement la possibilité de prévenir les risques environnementaux et sanitaires. En général, la distribution constante dans le temps d'engrais tels que le compost, les boues ou les digestats (biomasse obtenue par fermentation anaérobie pour obtenir du méthane) apporte au sol des quantités de métaux supérieures aux quantités naturelles, générant certains risques : cytotoxicité, inhibition des micro-organismes, baisse de la fertilité, bioaccumulation et contamination de l'eau potable. Les plans de fertilisation doivent évaluer les risques liés à l'apport de produits chimiques dangereux autres que les composés azotés, car ils sont présents en fortes concentrations. La négligence de cet aspect conduit à des modifications dangereuses des caractéristiques chimiques des sols, entraînant une baisse de la fertilité.

LE COMPOST : FERTILISATION OU ÉLIMINATION DE SUBSTANCES DANGEREUSES ?

La frontière entre la fertilisation et la distribution de polluants est dans de nombreux cas difficilement délimitable, et dépend également des quantités par rapport aux besoins. Chaque culture et chaque contexte (sol, précipitations, climat) requiert un besoin optimal en nutriments et dans des proportions différentes. Toutefois, les estimations des besoins des cultures ne portent généralement que sur les composés nécessaires en grandes quantités, comme l'azote, avec le risque de dépasser les "micronutriments", c'est-à-dire ceux qui sont nécessaires en faibles quantités (certains métaux, par exemple).

Le compost peut être dérivé de la fermentation aérobie de diverses matrices, dont les effluents d'élevage et les déchets solides municipaux : la durée du processus ne doit pas être inférieure à 90 jours et la température pendant la phase de bio-oxydation doit être maintenue au-dessus de 55°C pendant au moins cinq jours (de préférence deux semaines). Quelle que soit la classification réglementaire considérée, le compost est capable de fournir des substances utiles aux plantes et constitue un bon système de valorisation des matières. Le compost classé de qualité est obtenu par le compostage de déchets organiques collectés séparément et répondant aux exigences et caractéristiques fixées par la réglementation. Un compost de qualité peut entrer dans la catégorie des amendements, c'est-à-dire des matières ajoutées au sol principalement pour préserver ou améliorer ses caractéristiques physiques et chimiques et son activité biologique.⁹²⁴ Outre les amendements, le compost de qualité peut également être utilisé pour le paillage, c'est-à-dire le recouvrement du sol par une couche de matériau de 3 à 10 cm d'épaisseur, afin de conserver l'humidité, de protéger le sol de l'érosion, d'empêcher la formation d'une croûte de surface, de réduire le compactage, de maintenir la structure du sol et d'augmenter sa température. L'utilisation de compost dérivé des déchets solides municipaux est encouragée.⁷⁴¹

Les boues peuvent être utilisées pour produire des amendements compostés mixtes. L'utilisation des boues comme amendement des sols augmente les concentrations de substances qui sont également dangereuses pour les plantes (phytotoxiques) et la fertilité des sols.^{926, 931, 932} Pour réduire les risques chimiques et biologiques, plusieurs restrictions ont été adoptées au fil du temps en Italie. Les boues provenant de l'épuration des eaux usées (par exemple, du réseau d'égouts) ne doivent pas dépasser 35% du mélange initial, exprimé en pourcentage du poids, et peuvent être appliquées sur les sols à des doses ne dépassant pas 15 t/ha de matière sèche, sur une période de trois ans.

Dans le cas de la production de compost, certains dangers deviennent plus probables en raison de l'utilisation de matières premières mal triées contenant des contaminants tels que le verre, les emballages, les métaux, les plastiques, les piles, etc. Les substances présentes dans le compost issu de la fraction organique des déchets solides municipaux qui sont classées comme cancérigènes ou potentiellement cancérigènes comprennent l'arsenic, l'amiante, le chrome hexavalent, le nickel et les polychlorobiphényles (PCB). Certaines substances indésirables

peuvent provenir de transformations au cours du compostage (par exemple, les micro-organismes, leurs spores et leurs toxines, les substances odorantes et les composés volatils). Les dangers potentiels qui peuvent être évalués dans la production de compost sont les suivants :

- Composés organiques tels que solvants, graisses, hydrocarbures halogénés, dioxines, PCB, composés aromatiques polycycliques et esters comme les phtalates. Les dioxines (dibenzo-p-dioxines polychlorées et dibenzofuranes polychlorés) comptent plus de 200 molécules et se forment pendant la combustion à partir de précurseurs organiques chlorés (par exemple le PVC).
- Les substances inorganiques telles que : ^{912, 928, 929, 930}
 - l'arsenic (trouvé dans le sol traité avec le compost jusqu'à 90 ppm) ;
 - le nickel (présent dans le compost à des concentrations comprises entre 0,8 et 1.220 ppm) ;
 - le mercure (présent dans le compost à des concentrations comprises entre 0,9 et 23 ppm) ;
 - le plomb (présent dans le compost à des concentrations comprises entre 11 et 1.312 ppm, avec une biodisponibilité maximale de 75%) ;
 - le cadmium (présent dans le compost à des concentrations comprises entre 0,3 et 12 ppm, avec une biodisponibilité maximale de 52%, en fonction du pH du sol) ;
 - l'amiante, le cuivre, le chrome hexavalent et le zinc.

Ces substances peuvent provenir de contaminants présents dans les déchets solides municipaux, tels que les piles, le plastique, le verre, les matériaux ferreux, le papier, etc.

Les concentrations de métaux autorisées dans les amendements pour sols tels que le compost sont beaucoup plus élevées que les concentrations naturelles dans les sols, voire plus de 10 fois plus élevées, par exemple pour le mercure et le cadmium, ou au moins 5 fois plus élevées pour le plomb. ⁹²⁵ En conséquence, la composition du sol change dangereusement au fil du temps. Dans certains cas, la phytotoxicité élevée de certaines substances réduit la bioaccumulation. Par exemple, le nickel est généralement phytotoxique à des concentrations inférieures à celles qui sont dangereuses pour la santé humaine, de sorte que la voie de bioaccumulation dans la chaîne alimentaire végétale ne semble pas être importante. Les métaux tels que le cuivre et le zinc peuvent également avoir des effets phytotoxiques.

Les risques tels que ceux qui découlent de la distribution systématique de contaminants dans l'environnement et dans la chaîne alimentaire à des concentrations supérieures à celles qui sont naturellement présentes sont facilement prévisibles. Les quantités de certains contaminants apportées avec le compost sont bien plus élevées que celles qui pourraient résulter, par exemple, de la seule contamination de l'air. On peut donc s'attendre à ce que les substances dangereuses présentes dans le compost se bioconcentrent dans la chaîne alimentaire et causent des problèmes environnementaux (effets phytotoxiques, contamination de l'eau, etc.). Certains d'entre eux, comme le zinc, peuvent avoir des effets négatifs sur l'activité microbologique des sols et sur la fertilité. ⁹²⁶

Les concentrations de certains contaminants dans le compost (par exemple, les métaux lourds ou les particules) seront plus élevées que dans les déchets dont ils sont issus, en raison de la diminution de la masse générée par la perte d'eau et, dans certains cas, de la formation de nouvelles substances.

Tous les types de compost, et en particulier ceux dérivés des déchets solides municipaux ou des boues, contiennent des substances dangereuses telles que des métaux (par exemple, du cadmium, du chrome, du mercure, du nickel, du plomb, du cuivre et du zinc) à des concentrations supérieures à celles naturellement présentes dans les sols, et modifieront donc la composition de ces derniers. Le compost obtenu à partir de boues issues du traitement des eaux usées présente toujours une teneur en métaux plus élevée que le compost obtenu à partir du

traitement mécanique de déchets indifférenciés et que le compost obtenu à partir de la collecte sélective.

Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) se retrouvent dans le compost à des concentrations comprises entre 1.500 µg/kg (déchets ménagers organiques) et 12.000 µg/kg de poids sec (matière première verte provenant de zones rurales ; analyses effectuées en Allemagne). Certains travaux scientifiques trouvent des HAP dans 100% des échantillons de compost. Le compost issu des eaux usées municipales ou des matières organiques provenant de zones fortement urbanisées contient des concentrations plus élevées de HAP. En examinant le profil des composés aromatiques polycycliques, il est possible de savoir si la matière organique a été polluée par la combustion du pétrole, de la houille ou du charbon, et de retrouver le lieu de la contamination (zone industrielle ou urbaine, par exemple).

En général, les HAP se trouvent en plus grande concentration dans les feuilles et les déchets verts : jusqu'à 6 fois plus concentrés (concentrations maximales) que dans les déchets organiques de cuisine ou de ménage. Les concentrations plus élevées trouvées dans les déchets verts et les feuilles peuvent s'expliquer en partie par la bioaccumulation à partir de l'air.

Les sols arables peuvent avoir des concentrations moyennes de HAP de 200 µg/kg de matière sèche et les sols urbains de 1.100 µg/kg de matière sèche. Le compost issu de matières premières collectées dans les zones urbaines présente une concentration moyenne de 2.700 µg/kg de matière sèche.

Le compost est utilisé en grandes quantités, entre 8 et 300 tonnes sèches/ha/an, ce qui a pour effet d'apporter plus de polluants organiques au sol que les dépôts aériens ou d'autres engrais, comme les effluents d'élevage. Le fumier animal contient également des quantités de contaminants, tels que des métaux, dans des concentrations qui peuvent être supérieures à celles réglementées pour le compost, et aux concentrations du sol naturel.

En résumé, on peut affirmer que les concentrations de HAP détectables dans différents types de compost (à une concentration de 1.800 µg/kg de matière sèche), et en particulier dans le compost dérivé des DMSF (la fraction organique des déchets solides municipaux), sont supérieures à celles naturellement présentes dans le sol, d'un facteur pouvant atteindre 10. Les polychlorobiphényles (PCB) pendant la phase de compostage doublent leur concentration par rapport à la concentration de départ, en raison de la réduction de la masse (une très petite fraction se dégrade ou se volatilise). La concentration de PCB peut également être jusqu'à un facteur 15 supérieur à la concentration naturelle dans les sols arables. Il en va de même pour les dioxines (dibenzodioxines polychlorées et dibenzofuranes polychlorés).

Dans le compost, certains pesticides de la catégorie des organochlorés sont trouvés jusqu'à des concentrations de :

- 15 µg/kg de matière sèche, pour l'aldrine ;
- 850 µg/kg de matière sèche pour les molécules de DDT, Dichloro-Diphényl-Trichloro-éthane (dans le compost de déchets verts) ;
- 32 µg/kg de matière sèche pour le thiabendazole ;
- 76 µg/kg de matière sèche pour la cyfluthrine.

Ainsi, même pour ces molécules, le compost peut apporter des concentrations de pesticides plus élevées que celles présentes dans le sol.

En conclusion, les molécules indésirables sont souvent délivrées par le compost au sol à des concentrations plusieurs fois supérieures à celles présentes à la suite d'autres contaminations anthropiques. Il conviendrait donc de gérer et de réglementer les plans de fertilisation en ne se basant pas seulement sur quelques paramètres tels que la quantité d'azote ou quelques autres nutriments comme le phosphore et le potassium. Il convient de prévenir le risque de modifications négatives et, dans certains cas, irréversibles des caractéristiques du sol.

Dans les DMAO, certains contaminants tels que les métaux, le verre ou les plastiques constituent une contamination inévitable : la contamination la plus faible pouvant être obtenue

avec la meilleure collecte séparée (estimée en Italie) est d'environ 3% de métaux, plastiques et verre.

Le changement négatif des caractéristiques du sol augmentera au fil des ans en raison de l'accumulation. Les estimations de la situation dans le Piémont suggèrent qu'après 10 ans d'utilisation de compost dérivé de déchets séparés, une quantité de plastique, fer et verre de 200 g par mètre carré est susceptible d'être distribuée, ou 1.500 g si le compost est dérivé de déchets indifférenciés. Même le compost qui répond aux critères les plus restrictifs contiendra des quantités élevées de matières potentiellement négatives.

Les autres risques associés aux activités de compostage sont les suivants :

- la diffusion des lixiviats générés par les eaux de pluie ;
- l'attraction d'animaux tels que les oiseaux, les rongeurs et les insectes ;
- la propagation des mauvaises herbes ;
- la propagation d'organismes pathogènes dans l'agriculture (par exemple, l'insecte phylloxéra, *Daktulospharia vitifolia*, peut se propager dans la viticulture à la suite de l'utilisation de compost contaminé, s'il est utilisé dans des sites proches des vignobles ; certains virus des plantes, comme le virus de la mosaïque du tabac, peuvent également être propagés par le compost).

La conclusion logique de ce qui précède est que le compost issu de déchets non triés ou de matières organiques contenant des contaminants dangereux, comme les boues d'épuration, ne doit pas être utilisé à des fins agricoles. En outre, dans de nombreuses régions d'Italie, comme la plaine du Pô, la disponibilité des engrais potentiels est supérieure aux besoins, ce qui laisse le choix. Les réglementations nationales et régionales fixent des critères chimiques, physiques et microbiologiques pour l'acceptabilité d'un déchet à utiliser pour produire du compost. Les concentrations autorisées dans les matières premières utilisées pour produire du compost à partir de déchets de mauvaise qualité sont trop élevées, comme celles établies pour les boues issues du traitement des eaux usées. Les critères d'acceptabilité pour la production de compost à partir de boues sont beaucoup plus élevés que ceux autorisés pour le compost de déchets organiques collectés séparément. Les boues ne doivent donc pas être utilisées en agriculture, que ce soit directement ou après un processus de compostage. Pour les boues et les déchets non triés, la mise en décharge est l'élimination la moins nocive pour l'environnement et la chaîne alimentaire par rapport à la fertilisation.

Pour pouvoir répartir les quantités de matière organique provenant des élevages, de l'épuration des eaux usées (civiles et industrielles), de la gestion des déchets urbains et industriels, en respectant uniquement le critère dicté par les quantités d'azote (un maximum de 340 kg d'azote par hectare et par an), il serait nécessaire d'avoir, dans le nord de l'Italie, au moins une autre vallée du Pô (sans tenir compte des autres apports tels que les engrais chimiques de synthèse). Dans certains départements à forte densité d'élevage, il serait nécessaire de disposer de trois fois la surface actuellement disponible pour l'agriculture. Le transport sur de longues distances (plus de 15 km) n'est pas et sera de moins en moins pratique, car les coûts augmenteront (par exemple, le carburant). Jusqu'à présent, les externalités, c'est-à-dire les coûts environnementaux tels que la pollution de l'air, de l'eau et du sol, n'ont pas été correctement prises en compte. Par conséquent, dans un contexte tel que celui qui prévaut actuellement dans le Piémont (et dans la plaine du Pô), c'est-à-dire un excès de matière organique par rapport à la capacité du système agricole à la recycler de manière éco-durable, il pourrait être pratique :

- Réduire la quantité de déchets organiques en diminuant le nombre de fermes sans terre.
- Augmenter la récupération d'énergie à partir du fumier, par la fermentation anaérobie, en particulier dans les exploitations sans terre. Cela réduit l'apport de matières organiques excédentaires dans l'environnement.

- Augmenter la valorisation énergétique en installant des unités de biogaz dans les centres de traitement des eaux usées et dans les usines de traitement des déchets municipaux et industriels.
- Diminuer les quantités de matrices organiques de faible qualité destinées à l'agriculture, telles que les boues d'épuration ou le compost issu de la collecte de déchets indifférenciés, qui pourraient être destinées à la mise en décharge.

La distribution en agriculture d'un excès de substances organiques et inorganiques est l'un des systèmes les plus efficaces que l'on puisse imaginer pour polluer l'environnement et contaminer la chaîne alimentaire.

LES FONCTIONS ÉCOLOGIQUES DU SOL SONT SOUS-ESTIMÉES

Le sol est maltraité, dégradé et, en même temps, nous ne connaissons toujours pas la plupart des formes de vie qui l'habitent : celles-ci contribuent aux équilibres indispensables à la croissance des plantes et à notre survie. La biomasse du sol est en grande partie constituée d'êtres vivants ; les innombrables organismes présents dans le sol sont la source de sa fertilité. Un hectare de sol agricole fertile peut contenir 100 t de matière organique, une biomasse d'invertébrés et de micro-organismes de 10.000 kg et contenir au moins 4.000 espèces différentes de micro-organismes tels que des bactéries.⁴²⁵ Un sol très fertile peut probablement contenir plus de 20.000 espèces de bactéries avec une biomasse de plus de 3.000 kg/ha. Dans un mètre cube de sol, on peut trouver 50.000 insectes et acariens, et 12 millions d'annélides. Un seul gramme de sol peut contenir des milliards de bactéries, des centaines de milliers de champignons, des dizaines de milliers de protozoaires et d'algues. Cette biodiversité, utile à l'agriculture, est gravement menacée par les méthodes modernes qui utilisent des stratégies qui ne sont ni conservatrices ni durables. La monoculture d'individus génétiquement identiques, le travail du sol et la fertilisation, ainsi que l'élimination des espèces sauvages, entraînent une réduction irréversible de la biodiversité.

Les racines des plantes font partie d'un écosystème du sol très complexe dans lequel les micro-organismes et les plantes échangent des substances et des faveurs. Les racines peuvent sécréter de grandes quantités de glucides et de protéines pour attirer les micro-organismes. À leur tour, les micro-organismes produisent des composés utiles aux plantes (par exemple, des substances à action hormonale). La matière organique du sol est donc constituée d'êtres vivants, de résidus végétaux et animaux en décomposition, de molécules synthétisées principalement par des micro-organismes et produites dans le sol par des réactions chimiques. Plus la quantité de matière organique est importante dans le sol, meilleure est sa fertilité.

Les interactions entre les différents êtres vivants dans et hors du sol sont largement inconnues. Parmi les curiosités extraordinaires de la nature figurent certaines espèces de cigales que l'on trouve aux États-Unis. Leurs stades juvéniles passent des années sous terre, se nourrissant des racines des arbres. Les adultes sortent pour s'accoupler tous les 13 à 17 ans. Il semble que certaines espèces de cigales synchronisent leur cycle de vie avec les nombres premiers, c'est-à-dire les nombres qui ne peuvent être divisés que par 1 et eux-mêmes.⁸⁴⁸ Une autre particularité de certaines espèces de ces insectes est que les mâles peuvent produire des sons très intenses (jusqu'à 120 décibels).

Le sol remplit plusieurs fonctions, dont certaines sont évidentes et d'autres sous-estimées : en plus d'être le lieu de vie d'une énorme biodiversité, nécessaire à la fertilité et plus encore (par exemple, il accueille certains pollinisateurs et certains parasites des ennemis des plantes), il garantit la production alimentaire, fournit de l'oxygène, stocke le dioxyde de carbone, retient et nettoie l'eau, et peut nous protéger des phénomènes hydrogéologiques extrêmes. Les fonctions

culturelles, esthétiques, récréatives et éducatives, qui sont fondamentales pour notre bien-être, ne sont pas non plus négligeables. La richesse des fonctions vitales assurées par le sol n'est cependant pas suffisamment appréhendée et évaluée, notamment lorsqu'on examine les choix de gestion de l'utilisation des terres ou lorsqu'on prend soin d'observer l'état de dégradation généralisée. Le sol est l'un des principaux puits de dioxyde de carbone de la biosphère, bien plus que l'atmosphère : les premiers centimètres du sol contiennent probablement au moins 3,3 fois plus de carbone que l'atmosphère et au moins deux fois plus que la végétation et l'atmosphère réunies.⁸ Il est utile de rappeler ici que les sols forestiers peuvent stocker entre 70 et 100 t/ha de dioxyde de carbone, les terres agricoles la moitié de cette quantité et les sols imperméabilisés (recouverts de béton) zéro. Probablement 60% du carbone qui était présent dans les sols depuis 1800 a été perdu en raison des activités humaines.⁸ Ce sont des valeurs écologiques auxquelles nous sommes aveugles, difficiles à monnayer, et nous oublions facilement qu'il s'agit des services indispensables pour soutenir les générations futures.

L'agriculture industrielle traite le sol comme s'il s'agissait d'un substrat inerte et peut se permettre de le faire car elle investit beaucoup plus d'énergie qu'elle ne peut en obtenir. En exploitant les combustibles fossiles, nous pouvons temporairement nous bercer de l'illusion que nous n'avons pas à nous inquiéter (il serait plus intelligent de dire "s'inquiéter") de la fertilité des sols. Lorsque tant d'énergie est disponible, il est également possible de cultiver le désert. Cette approche génère des changements irréversibles et donc non durables. Nous ne devrions pas le permettre, le sol est nécessaire à la survie de chacun et des prochaines générations, personne ne devrait avoir la liberté ou le droit de le détruire à volonté, comme cela se passe aujourd'hui en toute impunité. Nous devrions être effrayés par la dégradation actuelle et nous empresser de restreindre ces libertés individuelles.

Peu de gens sont horrifiés par l'existence en Italie de milliers de plans d'urbanisme différents, qui sont gérés de manière indépendante par les administrateurs locaux et qui permettent en fait de gérer librement le sol. Dans le nord de l'Italie, environ 50% des sols de plaine ont une teneur en matière organique très faible, inférieure à 2%. Avec une concentration aussi faible de matière organique, on considère qu'un sol est menacé de désertification et qu'il a compromis sa capacité à retenir et à dégrader les pesticides, qui sont donc plus susceptibles de finir par contaminer l'eau.

Nous avons laissé passer l'idée que la destruction ou la soustraction d'une ressource environnementale aux générations futures n'a pas de prix. Il est difficile de donner une valeur à cet héritage, mais il est certainement beaucoup plus élevé que celui du marché des sols dans l'agriculture ou dans le secteur de la construction.

Les différents types d'utilisation des sols, même dans le secteur agricole, ne sont pas équivalents et doivent être choisis avec prévoyance et attention. La production d'un kilo de viande bovine nécessite au moins 18 mètres carrés de sol par an (et libère au moins 0,5 kilo de méthane), mais la production d'un kilo de blé nécessite moins de 2 mètres carrés de sol par an.

Pour déterminer ce qu'il convient de produire à partir du sol, il faut tenir compte de la quantité de calories et de nutriments pouvant être obtenue par unité de surface, du rapport entre l'apport énergétique et la production d'énergie, des besoins en eau (par unité calorique), de la quantité de dioxyde de carbone émise (par unité calorique), de l'impact sur l'acidification des océans, de la qualité de l'eau et de la santé des agriculteurs et des consommateurs.

Ne considérer que les règles du marché ou celles établies par quelques acteurs économiquement forts et politiquement influents est un aveuglement que nous ne pouvons plus tolérer. Les besoins des communautés locales et la santé de la planète doivent devenir les éléments décisifs de la planification du système agricole. L'agriculture en Europe occupe 40% de la surface totale et emploie directement au moins 22 millions de personnes : un nombre équivalent de travailleurs est employé dans le secteur de la transformation industrielle et dans les services connexes.⁸⁷¹ Sur ces 40%, 18% sont des prairies et 46% ne sont pas irriguées. En 2016, moins de 7% de la

surface agricole européenne était occupée par l'agriculture biologique : une surface à peu près équivalente à la surface agricole utilisée en Italie : 11,9 millions d'hectares. En Europe, on observe une réduction de la surface agricole depuis plus de 20 ans : entre 2000 et 2017, de 5% (environ 80.000 ha par an).⁸⁷¹ Entre 2010 et 2015, la réduction de la surface agricole a été d'environ 0,3% par an.

Laisser le contrôle à la liberté d'action de quelques entrepreneurs et à des règles économiques stupides a conduit à des concentrations contre-productives : en Europe, 3% des exploitations contrôlent plus de 50% de la surface. Ces exploitations ont une taille moyenne de plus de 100 hectares, tandis que 65% des exploitations ont une superficie inférieure à 5 hectares ; les exploitations de plus de 50 hectares représentent 68% de la superficie agricole totale de l'Europe.⁸⁷¹ Théoriquement, il devrait être plus facile de diffuser un modèle d'agriculture plus écologique s'il y a peu de parties prenantes, mais c'est en fait le contraire qui se produit.

La valeur du sol ne doit plus être calculée uniquement sur la base de ce qui peut être cultivé ou construit. Il faut lui attribuer une valeur écologique (protection de la biodiversité, stockage du dioxyde de carbone, eau propre), une valeur pour la communauté (loisirs, réduction de la température, réduction du bruit et de la pollution atmosphérique) et une autre pour les générations futures. Ces catégories de valeur sont ignorées aujourd'hui, mais si nous étions plus clairvoyants, plus intelligents et moins égoïstes, nous constaterions qu'elles sont au moins de plusieurs ordres de grandeur supérieures au prix attribué par les marchés administrés pour satisfaire les intérêts matériels et éphémères des particuliers. Le sol est l'un des biens les plus précieux de l'humanité. Il se forme sur une très longue période, à la suite de processus biogéochimiques complexes, mais il peut être dévasté par quelques minutes de travail agricole ou par le temps nécessaire pour l'acheter et le vendre pour l'urbanisation.

LA FERTILITÉ ET LA SÉCURITÉ ALIMENTAIRE SONT ÉTROITEMENT LIÉES : IL FAUT UNE CONSOMMATION ZÉRO DES TERRES

La partie majeure de la biomasse de la planète se trouve dans les océans, mais plus de 99,7% de l'alimentation humaine provient de l'environnement terrestre et moins de 0,3% des écosystèmes aquatiques.^{14, 263} L'homme et les animaux d'élevage représentent au moins un quart de la biomasse animale terrestre.¹¹⁴

Les pratiques qui endommagent les sols comprennent (mais ne sont pas limitées à) le labourage, la fertilisation (par exemple, la distribution de boues, de compost de mauvaise qualité et d'engrais chimiques), la distribution de poisons tels que les pesticides, la pollution (par exemple, les métaux déposés par l'atmosphère et les déchets), la monoculture, l'irrigation, le fait de laisser le sol non cultivé et non planté, le fait de ne pas restituer la matière organique prélevée sur le sol, l'utilisation de techniques utilisant du plastique (paillage, irrigation). Ces pratiques, en plus de dégrader les sols, favorisent l'érosion et entraînent une perte de fertilité et finalement la désertification. Le taux d'érosion peut être beaucoup plus rapide que le taux de régénération, ce qui en fait un processus de dégradation irréversible.⁹⁷ On estime qu'au moins 10 millions d'hectares de terres agricoles sont abandonnés chaque année en raison de la perte de productivité causée par l'érosion.⁴²⁵ L'érosion poussée par l'eau et le vent déplace d'énormes quantités de matériaux. Si l'érosion se produit à un taux de 2 t/ha par an sur 20 ha, pendant 50 ans, suffisamment de sédiments seront transportés pour former une zone de 10.000 m de large² et de 15 cm de profondeur.

Dans la nature, un sol forestier subit généralement moins de 0,05 t/ha/an d'érosion. Une érosion de plus de 1 t/ha/an peut être considérée comme non durable car elle est supérieure à la capacité de régénération naturelle. En général, l'érosion des terres agricoles est 500 à 1.000 fois plus

rapide que celle des terres forestières.⁹¹ Au fil des années, le sol perd sa capacité à soutenir les plantes, à moins que l'homme n'y apporte des apports artificiels : engrais, pesticides, irrigation, etc. En Europe, les terres agricoles représentent 47% de la superficie totale des terres et on estime que le taux moyen d'érosion est d'environ 3,2 t/ha par an ; en Italie, au moins un tiers de la superficie des terres est soumis à une érosion intense et au moins 27% du territoire est touché par la sécheresse et la désertification. Les cultures présentant des niveaux élevés d'érosion comprennent les vignobles, les oliveraies et les vergers.

L'eau utilisée pour l'irrigation contient des sels. Si on distribue 10 millions de litres par hectare et par an, par exemple dans le cas du maïs, cela signifie que jusqu'à 5 t/ha de sels peuvent être libérés dans le sol.⁴²⁵ Chaque année, au moins 10 millions d'hectares de terres agricoles sont rendus inutilisables pour l'agriculture en raison de la salinisation et environ 50% de tous les sols irrigués souffrent d'une augmentation des concentrations de sel.⁴²⁵ Si les prévisions d'élévation du niveau des mers se réalisent, la concentration de sel marin dans l'eau et les sols augmentera, ce qui posera des problèmes pour l'agriculture et l'approvisionnement en eau potable.

Le taux de perte de sol est très rapide. La couche fertile n'a normalement que quelques centimètres d'épaisseur (entre 30 et 80-90 cm) et le labourage peut générer une perte d'un millimètre par an.⁷⁶¹ Dans le passé, la perte de sol (il y a des milliers d'années) était cent fois moins importante : 1 millimètre tous les 100 ans. La fertilisation chimique et la culture des céréales réduisent chaque année de 0,5 à 1% la quantité de carbone (un indicateur de fertilité) dans le sol. Le taux de perte de sols fertiles est donc beaucoup plus élevé qu'il ne le serait sans intervention humaine.

Les sols fertiles retiennent plus efficacement l'eau, un bien précieux qui est appelé à devenir de plus en plus rare et pollué. L'augmentation de la matière organique du sol de 1% à 3-4% améliore non seulement la fertilité mais double également la capacité de rétention d'eau.

Un principe de base très simple est le suivant : dans la nature, le sol n'est jamais labouré ou labourable et est presque toujours recouvert d'un lit de matières végétales en décomposition. Les mouvements du sol et l'absence de couverture végétale portent gravement atteinte à la fertilité nécessaire à la survie de la biosphère terrestre. Le travail du sol nuit également aux insectes pollinisateurs. Il faut rappeler que probablement 70% des espèces d'abeilles construisent leurs nids dans le sol.³⁶² Le labourage détruit donc les chances de survie d'un écosystème très complexe, largement méconnu mais nécessaire au maintien de la fertilité.

La fertilité du sol est très importante, car un manque de nutriments pour les plantes peut réduire ou annuler les avantages pour les pollinisateurs. Il est connu que les pollinisateurs (*Apis mellifera* et *Bombus terrestris*) n'augmentent la quantité de graines produites par les plantes de tournesol que si de bonnes conditions de fertilité existent.⁴⁷⁶ De bonnes conditions de fertilité et de pollinisation sont nécessaires pour enregistrer une augmentation de 18,5% à 19,8% de la production de graines chez les plantes de tournesol.⁴⁷⁶ Il convient de rappeler que les plantes de tournesol peuvent générer une production de graines acceptable même en l'absence de pollinisation entomophile. La conclusion évidente de certaines études scientifiques est qu'une réduction de la fertilité du sol peut annuler les avantages fournis par les pollinisateurs, c'est-à-dire que la production de graines n'augmente pas en présence d'insectes si les nutriments sont déficients (ce résultat était attendu mais a été confirmé). La gestion des sols doit donc garantir le maintien et l'augmentation de la fertilité.

La création d'un sol dans la nature nécessite des siècles d'attente, et la création artificielle n'est possible que si de grandes quantités de substances organiques et d'énergie sont disponibles. La régénération d'un sol infertile n'est donc possible que sur de petites surfaces.

Nous utilisons au moins un tiers de la surface terrestre libre de glace pour la culture des aliments et l'élevage des animaux ; en Europe, cela représente 40% de la surface terrestre totale. Nous avons déjà dégradé au moins un tiers des sols de la planète qui sont utilisés à des fins agricoles. Un tiers, c'est beaucoup. Cela signifie compromettre sérieusement notre capacité à produire de

la nourriture, altérer la capacité de la biosphère à soutenir la biodiversité et à fournir des services essentiels à notre survie. Le sol joue un rôle dans la purification de l'eau, la régulation du climat, la séquestration du dioxyde de carbone et bien d'autres fonctions que celle de permettre la production alimentaire. Nous détruisons cette fine couche dont nous sommes inextricablement dépendants. La fertilisation chimique ne peut pas restaurer la fertilité des sols car elle n'apporte que quelques substances.

À l'échelle mondiale (estimation 2015), la dégradation des sols réduit la capacité de production alimentaire de près de 0,5% par an. En Europe, les terres agricoles sont réduites de 0,3% par an.⁸⁷¹ Les sols américains ont déjà perdu 50% de leur fertilité.⁷⁶¹

Actuellement, 19% de la surface de la terre est aride et environ 10% est recouverte de glace, de sorte qu'elle ne peut être cultivée. Moins de 69% de la surface de la terre peut être occupée par des plantes : 26% de la surface de la terre est couverte par des forêts et 34% sont des terres agricoles dont 23% sont occupées par des prairies. La disponibilité de sols fertiles par habitant diminue régulièrement en raison de divers facteurs (par exemple, l'urbanisation, la désertification, l'agriculture industrielle, la déforestation, l'érosion, la salinisation), mais la population augmente et la dégradation progresse plus rapidement que la croissance démographique : entre le milieu des années 1950 et la fin du siècle, l'augmentation des zones urbanisées est au moins 2,5 fois plus importante que l'augmentation de la population (78% contre 33%).⁷⁷³ En 2050, la population mondiale pourrait atteindre entre 9 et 10 milliards d'habitants et, selon certaines prévisions, elle devra augmenter de 60 à 110% pour répondre aux besoins nutritionnels.⁸⁵¹ Comment pouvons-nous espérer doubler la production alimentaire mondiale avant 2050 ? Des indicateurs alarmants mettent en évidence le phénomène inverse :

- Réduction de la fertilité.
- Diminution de la surface occupée par l'agriculture.
- Augmentation de l'imperméabilisation des sols et de l'urbanisation.
- Réduction de la productivité due au changement climatique (sécheresse, grêle, pluies torrentielles, vagues de chaleur ; cette dernière en Russie en 2010 a entraîné la perte de 30% du blé et l'interdiction consécutive des exportations avec des effets négatifs dans d'autres pays).⁸⁷¹
- Réduction de la disponibilité de l'eau pour l'irrigation alors que, en même temps, la demande d'irrigation devrait augmenter en raison de la diminution des précipitations, en particulier lorsqu'elles sont nécessaires à l'agriculture.
- Réduction des services fournis par la nature, tels que ceux rendus par la biodiversité, comme la pollinisation par les animaux et la défense biologique contre les parasites.
- Augmentation de la pollution et de la salinité des sols et des eaux.
- Augmentation de la désertification et des incendies.
- Augmentation des pertes dues aux parasites en raison, par exemple, d'hivers plus doux. Certains parasites sont favorisés par le changement climatique, comme ceux des oliviers, et l'on s'attend à un risque accru de mycotoxines dans les céréales, qui sont très dangereuses pour la santé humaine (certaines sont cancérigènes).
- Réduction de la valeur nutritionnelle des cultures, comme la diminution de la teneur en sucre des raisins ou de la teneur en protéines des céréales, en raison des changements climatiques. En raison de la mort des pollinisateurs, les carences en certaines vitamines vont augmenter.

En Europe, le changement climatique pourrait à lui seul réduire la production alimentaire de plus de 15% d'ici à 2050.⁸⁷¹ Il est donc nécessaire de commencer à agir avant qu'il ne soit trop tard. Nous devons parvenir à une consommation zéro des sols et augmenter la fertilité et la biodiversité le plus rapidement possible.

CONTAMINATION DU SOL ET DE L'EAU PAR LES NÉONICOTINOÏDES

La plupart des substances actives distribuées avec les semences, comme les néonicotinoïdes et le fipronil, ne sont pas absorbées : le pourcentage d'imidaclopride absorbé varie entre 1,6% et 4,5% pour les plants de coton, de pomme de terre ou de riz et, dans le cas du maïs, peut atteindre 20%.³⁵⁶ Certains ingrédients actifs sont très solubles, ils contaminent donc facilement l'eau (par exemple, l'acétamipride et le thiaméthoxame).³⁵⁹

La majeure partie de l'ingrédient actif qui a été distribué avec les graines reste dans le sol : jusqu'à 98%. Les plantes qui sont semées l'année suivante (ou les plantes sauvages) absorberont ces ingrédients actifs. Il ne faut pas oublier que de nombreux insectes (par exemple, les guêpes et les fourmis) peuvent construire leur nid ou passer une phase de leur vie dans le sol.

Les molécules des principes actifs et/ou leurs dérivés (métabolites) restent dans le sol et contaminent l'eau (ils sont utilisés dans la riziculture), car les principes actifs sont persistants. La demi-vie des néonicotinoïdes dans le sol peut être supérieure à 1.000 jours.³⁵⁹ Cela signifie que 10 grammes sont transformés en 5 grammes en plus de 1.000 jours, et que pour trouver moins de 2,5 grammes (un quart de la dose initiale), il faut attendre au moins 5 ans. Entre-temps, toutefois, des dérivés (métabolites) tout aussi dangereux peuvent se former.

Une fois le sol contaminé, les plantes sauvages qui poussent à l'intérieur et autour des zones traitées, ou après leur mise en culture, contiennent des néonicotinoïdes ou d'autres pesticides. Dans les champs où le maïs avait été cultivé, avec des graines imprégnées de clothianidine, les chercheurs ont retrouvé cette molécule dans les plantes sauvages (pissenlits ou *Taraxacum*), après la culture du maïs, à une concentration de 9 ng/g ; la clothianidine met jusqu'à 7.000 jours, soit plus de 19 ans, pour diviser par deux sa concentration dans le sol, et il faut rappeler qu'elle est aussi un métabolite du thiaméthoxame.³⁵⁹

En général, les pesticides peuvent rester dans le sol pendant très longtemps. L'imidaclopride reste et peut s'accumuler dans le sol, rendant les plantes qui y pousseront toxiques dans les années suivantes, endommageant les espèces non ciblées telles que les organismes vivant dans le sol et les plantes en décomposition. La clothianidine (insecticide néonicotinoïde) peut avoir une demi-vie variable dans le sol, comprise entre 148 et 1.155 jours.³⁶⁸ La recherche de néonicotinoïdes dans 74 échantillons de sol français, dont 7 provenant de l'agriculture biologique où l'utilisation de pesticides est interdite, montre que l'imidaclopride ne se retrouve pas dans ces 7 échantillons.³⁶³ Malheureusement, 62 échantillons de sol ont été contaminés : dans 65% de ces échantillons, l'imidaclopride a été trouvé dans des concentrations supérieures à 1 µg/kg. Seuls 10% des échantillons de sol contenant de l'imidaclopride ont été traités avec ce pesticide au cours de l'année de l'enquête. 91% des échantillons contenaient le néonicotinoïde mais seulement 15% avaient été semés avec des graines traitées avec l'insecticide. La contamination est due à des traitements qui ont eu lieu il y a longtemps, et confirme la persistance de cette molécule. Dans 7 des 11 échantillons de sol, qui n'avaient pas reçu d'imidaclopride au cours des deux années précédentes, on l'a trouvé à une concentration comprise entre 0,1 et 1,5 µg/kg (dans ce cas, on estime que la demi-vie de l'imidaclopride peut atteindre 1.230 jours, c'est-à-dire plus de 3 ans).^{359, 363} Dans 9 des 10 échantillons de sol, où du maïs, du blé ou de l'orge dont les graines contenaient de l'imidaclopride avaient sans aucun doute été semés, des concentrations comprises entre 2 et 22 µg/kg ont été enregistrées (concentration moyenne de 12 µg/kg ; un échantillon a enregistré moins de 1 µg/kg). Si l'échantillonnage est effectué peu après le semis, des concentrations beaucoup plus élevées peuvent être enregistrées : des centaines de millièmes de gramme dans chaque kilogramme. Dans une autre enquête, la présence d'imidaclopride a été étudiée dans des sols qui avaient été traités la même année ou deux ans auparavant. Sur ces 33 échantillons, 97% ont révélé la

présence de l'insecticide et 78% ont mesuré une concentration comprise entre 1,2 et 22 µg/kg. Dans les sols qui avaient reçu de l'imidaclopride l'année précédente, une concentration moyenne de 6 µg/kg a été détectée.

Les néonicotinoïdes appliqués sur les semences ne pénètrent que faiblement dans la plante : entre 1,6% et 20%.⁴³⁴ Entre 80% et 98,4% sont dispersés dans le sol et l'environnement, et peuvent également contaminer l'eau.

Les résultats de cette recherche montrent que la molécule reste dans le sol pendant des années, peut s'accumuler et se déplacer dans la biosphère. De plus, les concentrations trouvées ne sont pas négligeables car elles sont supérieures à celles qui provoquent des effets chroniques chez les abeilles.

Les néonicotinoïdes contaminent également l'eau : aux Pays-Bas, l'imidaclopride est l'une des trois substances les plus facilement trouvées au-dessus de la limite écotoxicologique (13 milliardièmes de gramme par litre) et se retrouve dans les eaux de surface à des concentrations 25.000 fois supérieures à cette concentration sûre.³⁵⁹

En 2010 et 2011, 89% des 75 échantillons d'eau de surface de Californie contenaient de l'imidaclopride et 19% des échantillons dépassaient la concentration de référence proposée par l'EPA (1,05 millionième de gramme dans un litre).³⁵⁹ On a également trouvé de l'imidaclopride dans les eaux souterraines de Californie à une concentration de 1 µg/L.

Les eaux canadiennes sont contaminées par l'imidaclopride et/ou la clothianidine et/ou le thiaméthoxame et/ou l'acétamipride : en 2012 et 2013, entre 16% et 91% des 440 échantillons étaient contaminés, selon les zones. Dans l'eau, la clothianidine était la molécule la plus fréquemment retrouvée et les concentrations les plus élevées étaient les suivantes : 54,4 ng/L pour l'acétamipride après la plantation de graines de colza traitées (concentration moyenne de 1,1 ng/L) ; 256 ng/L pour l'imidaclopride en 2012 dans des champs de blé avec des graines traitées (concentration moyenne de 15,9 ng/L) ; 1.490 ng/L pour le thiaméthoxame dans les champs semés de colza traité (concentration moyenne de 40,3 ng/L) ; 3.110 ng/L pour la clothianidine après la plantation de colza traité (concentration moyenne de 142 ng/L).

Au Québec, l'imidaclopride et trois de ses métabolites sont retrouvés dans 35% des échantillons d'eau de puits.

Dans l'État de New York, les concentrations d'imidaclopride dans l'eau variaient de 0,2 à 7 µg/L. En Espagne, l'imidaclopride a été retrouvé dans 58% des échantillons d'eau en 2010 et dans 17% des échantillons en 2011 à des concentrations comprises entre 2,34 et 19,2 ng/L.

En Suède, l'imidaclopride a été trouvé dans 36% des points d'échantillonnage de l'eau, y compris à des concentrations supérieures à la limite de 13 ng/L : dans 21 échantillons (la plus forte concentration enregistrée était de 15.000 ng/L, c'est-à-dire 1.154 fois plus élevée que le seuil de sécurité réglementé). L'acétamipride a également été trouvé à des concentrations maximales quatre fois supérieures aux concentrations limites : il a été trouvé à des concentrations allant jusqu'à 410 ng/L, avec une valeur limite de 100 ng/L.³⁵⁹

Les néonicotinoïdes contaminent largement les eaux, notamment les eaux de surface. Parmi les molécules les plus fréquemment retrouvées figure l'imidaclopride.¹¹⁷³ Dans certains cas, des problèmes avec la faune aquatique, comme les crustacés et les insectes, ont été confirmés (par exemple en Suède et dans le Maryland, aux États-Unis). Les macro-invertébrés aquatiques et les oiseaux insectivores peuvent être affectés par de très faibles concentrations de néonicotinoïdes dans les eaux de surface (quelques milliardièmes de gramme par litre).¹¹⁷³

Les analyses de risques effectuées par les différents pays sont très différentes, ce qui se traduit par des seuils de tolérance aux risques éco-toxicologiques d'ordres de grandeur différents. Malheureusement, les concentrations maximales admissibles fixées par la réglementation ne tiennent pas suffisamment compte des effets chroniques sur les invertébrés aquatiques et les niveaux suivants de la chaîne alimentaire. Malgré les limites fixées par la réglementation, certains moniteurs enregistrent des concentrations dans l'eau bien supérieures aux seuils

réglementaires (par exemple aux Pays-Bas, en Pologne, en Belgique, en Italie, en Californie et aux États-Unis).¹¹⁷³ Par exemple, en Californie, des concentrations d'imidaclopride de plus de 1.050 ng/L ont été enregistrées dans des eaux de surface contaminées par l'irrigation, tandis qu'au Maryland (États-Unis), des concentrations allant jusqu'à 27.000 ng/L ont été enregistrées, et aux Pays-Bas, jusqu'à 320.000 ng/L. Ces concentrations sont jusqu'à plus de 10.000 fois supérieures à celles capables de nuire à la faune aquatique et aux autres espèces sauvages. On observe également des concentrations alarmantes de néonicotinoïdes dans les eaux souterraines partout sur la planète (par exemple au Québec, aux États-Unis) : des concentrations supérieures à 400.000 ng/L ont été enregistrées dans les eaux souterraines de l'État de New York.¹¹⁷³

De nombreuses études montrent que les pesticides présents dans l'environnement modifient le cycle des nutriments, la décomposition de la matière organique et la respiration dans le sol. De très petites doses d'insecticides (par exemple, les néonicotinoïdes et le fipronil) nuisent aux invertébrés du sol et aux organismes aquatiques.⁴¹⁵ Les pesticides peuvent gravement compromettre la capacité des écosystèmes à remplir des fonctions essentielles à notre survie, comme assurer un approvisionnement sûr et régulier en nourriture. Les pesticides nuisent à la biodiversité du sol (fourmis, termites, abeilles, vers, bactéries, protozoaires, champignons), même à de très faibles concentrations. Certains insecticides (par exemple l'imidaclopride) réduisent la capacité des micro-organismes du sol à décomposer la matière organique (par exemple les feuilles). Les bactéries fixatrices d'azote (par exemple *Rhizobium* en symbiose avec les racines des plantes de pois) réduisent également leur capacité à séquestrer l'azote atmosphérique en raison de la présence de pesticides (par exemple Imidacloprid).⁴¹⁵ L'acétamipride diminue la capacité de respiration du sol. Par conséquent, les pesticides tels que les insecticides peuvent causer de graves dommages à l'écosystème du sol à de très faibles concentrations.

L'ALTÉRATION DES CYCLES BIOGÉOCHIMIQUES DE L'AZOTE ET DU PHOSPHORE

Au rythme actuel de croissance de la demande alimentaire, on peut s'attendre à ce qu'il faille cultiver au moins un milliard d'hectares supplémentaires en 2050 et à ce qu'ils soient prélevés sur les écosystèmes naturels (une superficie comparable à celle des États-Unis).⁶⁰⁴ Cette augmentation de la consommation de terres devrait s'accompagner d'une augmentation de l'utilisation d'engrais azotés et phosphorés : entre 2,4 et 2,7 fois plus qu'à la fin du siècle dernier. Les engrais azotés produits en 2000 représentaient environ 87 millions de tonnes, les prévisions pour 2050 sont de 237 millions de tonnes. Depuis plus de 20 ans, l'homme rejette chaque année dans l'environnement plus de composés azotés et phosphorés que ce que les écosystèmes mettent en circulation naturellement. Cette altération irréversible des écosystèmes est sans précédent dans l'histoire de l'humanité et s'accompagnera donc d'une simplification des habitats, d'extinctions massives et d'eutrophisation.

Nous avons atteint un niveau d'impact inquiétant : les activités humaines libèrent plus d'azote dans les écosystèmes que toutes les sources naturelles, principalement en raison de la chimie des engrais azotés. Les engrais azotés chimiques ont la caractéristique d'être plus facilement disponibles et plus facilement assimilables par les racines des plantes que les formes organiques (par exemple, le fumier). Nous pouvons affirmer qu'au moins 50% de la population mondiale est nourrie d'azote industriel.⁸⁴⁶

Le phosphore provient de gisements minéraux et constitue donc une ressource non renouvelable. Ce minéral sera probablement encore disponible à bas prix dans moins de 25 ans.⁸³⁷

Ces connaissances mettent en évidence plusieurs problèmes :

- Nous rejetons dans l'environnement de grandes quantités de composés azotés et phosphorés sous des formes très mobiles, contaminant ainsi l'eau. Les phénomènes négatifs qui en résultent sont l'eutrophisation des lacs, des rivières et des mers, et la pollution de l'eau potable par les nitrates.
- Altération des flux naturels dans la biosphère.
- Altération de l'écosystème du sol.
- De grandes quantités d'énergie fossile sont utilisées pour synthétiser les engrais azotés et extraire le phosphore du sol. Ces ressources sont disponibles en quantités limitées : l'azote dépend de la disponibilité des combustibles fossiles, tandis que le phosphore souterrain a, dans une large mesure, déjà été extrait des quelques mines de Chine, des États-Unis et du Maroc.

Dans les systèmes naturels, le phosphore et l'azote sont recyclés dans les cycles biogéochimiques ; ils ne sont donc pas gaspillés et ne doivent pas être ajoutés. Nous consommons ces minéraux sous forme de nourriture et d'aliments pour animaux et ne les restituons pas au sol, mais les accumulent dans les décharges ou finissent dans les eaux de surface (eaux usées). Nous devons améliorer la réutilisation des déchets organiques tels que les déchets alimentaires et les excréments d'animaux, y compris les humains. L'un des défis consistera à restituer les déchets alimentaires et le fumier au sol, de manière économique et sûre. Un des paradoxes de notre société est qu'entre 30 et 50% des aliments finissent à la poubelle alors qu'ils seraient encore comestibles.

Les micro-organismes et les polluants dangereux doivent être évités en recyclant les matières organiques telles que celles provenant des déchets solides municipaux (compost) et des systèmes d'égouts (par exemple, les plastiques, les détergents, les médicaments, les solvants, les colorants, etc.)⁷⁴¹

Continuer à extraire des substances du sol (et de l'atmosphère comme l'azote) sans les recycler, c'est compromettre les générations futures : aux États-Unis, moins de 3% des déchets alimentaires sont retournés au sol en 2010.⁸³⁷ Pour réduire les effets catastrophiques, il faudrait, d'ici le milieu du siècle, réduire de moitié les apports de phosphore dans les océans et de 70% les apports dans les rivières ; les apports d'azote devraient globalement être réduits de 70%.⁸⁵¹ Nous savons que nous devons réduire de 50%, voire de 70%, l'apport artificiel de nutriments utilisés dans l'agriculture, mais la production alimentaire devrait doubler d'ici 2050. Respecter les limites planétaires et espérer augmenter la production alimentaire sera impossible. Si nous continuons à ignorer les cycles naturels et à gaspiller les ressources, l'effondrement du système d'approvisionnement alimentaire sera inévitable.

LA PRÉVENTION DE LA DÉGRADATION DES SOLS

Il existe de nombreuses façons de protéger la fertilité et la santé du sol :⁷⁶¹

- Ne pas déplacer le sol, c'est-à-dire le perturber le moins possible : le labourage est à éviter. Le déplacement du sol détruit définitivement la vie d'insectes utiles aux agriculteurs, comme les nombreuses abeilles pollinisatrices qui effectuent une partie de leur cycle de vie dans le sol. Un grand nombre de graines sont stockées dans le sol et peuvent rester à l'état dormant pendant des années. Le labourage est l'une des pratiques qui favorise la destruction de cette biodiversité. Le sol est un puits de carbone car il contient beaucoup plus de carbone que l'atmosphère, les animaux et les plantes réunis (dans les trois premiers mètres de profondeur). Le labourage est l'une des pratiques qui réduisent la quantité de carbone stockée dans le sol. Augmenter la fertilité des sols équivaut à augmenter la quantité de carbone dans le sol (contrecarrer le changement

climatique). La réduction ou l'élimination du seul travail du sol (par exemple, le labour) peut générer une augmentation de la concentration de carbone organique et de composés azotés (et donc de la fertilité des 20 premiers centimètres) de 7 à 17% sur 8 ans.^{52, 80}

- Le sol doit toujours rester couvert de végétation : les avantages sont innombrables. La biodiversité microbienne augmente, la teneur en eau du sol s'accroît, la température maximale du sol peut chuter de plusieurs degrés : même plus de 20°C entre un sol forestier et un sol exposé au soleil. Les températures du sol supérieures à 33°C endommagent les formes de vie dans la rhizosphère (partie du sol autour des racines). L'érosion par l'eau et le vent est considérablement ralentie par la présence d'un couvert végétal, qui présente également un autre avantage : il réduit la prolifération des mauvaises herbes ou des espèces indésirables et diminue ainsi la nécessité d'utiliser des herbicides.

- Les espèces végétales doivent être différenciées à la fois dans le temps (rotation) et dans l'espace (polyculture ou cultures intercalaires) : il faut cultiver au moins trois plantes en même temps (diversification). La rotation et les cultures intercalaires augmentent la biodiversité dans le sol et dans la biosphère (insectes et oiseaux), rendent la vie plus difficile aux parasites et représentent beaucoup moins de risques pour l'agriculteur : si une culture échoue, les autres suivront. La monoculture n'existe pas dans la nature et constitue un système artificiel instable et vulnérable. L'un des principes de la rotation annuelle des plantes est que la même espèce ne doit pas être cultivée pendant un intervalle d'au moins deux ans (il est préférable que l'alternance soit plus longue). L'utilisation de légumineuses en rotation et en culture intercalaire augmente la teneur en azote et réduit les besoins en engrais. La rotation maïs-soja diminue les besoins en azote de plus de 50 kg/ha par an et augmente les rendements du maïs jusqu'à 10%. L'alternance de la culture avec des légumineuses (par exemple : céréales en été et légumineuses en hiver) peut générer une augmentation de la production équivalente à celle que l'on peut obtenir avec 15-200 kg d'azote par hectare et par an, selon les plantes utilisées et les conditions de culture.⁵² La culture de légumineuses en hiver présente l'avantage de protéger le sol contre l'érosion (on évite la perte de jusqu'à 18 t/ha de sol par an).

- Utiliser des engrais organiques au lieu d'engrais chimiques synthétiques. Aux États-Unis, seuls 5% des cultures reçoivent des substances organiques sous forme de fumier. Des enquêtes menées dans neuf États américains, qui produisent 80% de leurs cultures de maïs (*Zea mays*) et de soja (*Glycine max*) en rotation, ont révélé que 18% seulement des cultures de maïs et 6% seulement des cultures de soja recevaient du fumier comme engrais au lieu d'engrais chimiques.⁵⁶ L'épandage de fumier tel que le fumier avec un enfouissement profond immédiat (45 cm) ainsi que l'augmentation de la quantité d'azote disponible dans le sol, qui peut être mesurée même après 30 mois, peuvent être considérés comme une technique permettant d'économiser de l'énergie et de réduire la contamination de l'eau.⁹⁴

Les substances qui sont extraites avec les récoltes doivent être restituées, donc plus les extractions sont importantes, plus le sol se dégrade facilement, car il ne peut pas régénérer sa fertilité. Si les substances extraites (organiques et inorganiques) ne sont pas restituées, l'équilibre écologique de la rhizosphère sera altéré et le sol ne sera pas en mesure d'assurer la croissance de plantes saines. Au fil des ans, le sol s'assèche et se transforme en un substrat pauvre en vie et dépourvu de substances organiques.

- Ne pas distribuer de substances organiques riches en polluants, telles que les boues de traitement des eaux usées ou le compost de mauvaise qualité.⁷⁴¹
- Mise en œuvre d'analyses chimiques des sols et des plantes pour mieux gérer les besoins en nutriments.
- Réduire le délai entre la fertilisation et le moment où les plantes ont besoin des nutriments.
- Enfouir les résidus non alimentaires au lieu de les utiliser pour produire de l'énergie (par exemple, la paille). Les matières organiques qui ne sont pas utilisées ou qui constituent des déchets doivent être recyclées dans le sol afin d'éviter le recours à des intrants externes.
- Ne pas utiliser de pesticides.
- Éviter la contamination par des plastiques qui peuvent altérer le sol par une contamination directe et intentionnelle comme les résidus de paillage, les systèmes d'irrigation, les matériaux utilisés pour couvrir les cultures ou pour faciliter la récolte (bâches, filets).
- Réduire la compression et la compaction du sol générées par la pression des moyens mécaniques (tracteurs, remorques, moissonneuses, etc.).
- Consacrer une fraction du terrain à la végétation naturelle. Toutes les formes de perturbation telles que le labourage, la coupe et la distribution de pesticides doivent être évitées dans cette partie de la parcelle. Garder des zones tampons telles que des distances par rapport aux cours d'eau (au moins 20 m).
- Réduire le besoin d'irrigation : utiliser des systèmes qui économisent l'eau et évitent l'érosion. À cet égard, il convient de souligner que la disponibilité de l'eau d'irrigation diminue en raison de divers facteurs tels que le changement climatique, dans de nombreuses régions du monde comme l'Italie.
- Allonger le délai entre l'épandage et l'irrigation ou la pluie pour réduire les pertes d'azote dans l'eau.

Au moins l'adoption des trois principes de base d'une agriculture respectueuse de la santé des sols (pas de labour, maintien d'un sol couvert de plantes en permanence, augmentation du nombre d'espèces cultivées par la rotation et les cultures intercalaires) pourrait entraîner une augmentation significative du dioxyde de carbone piégé dans le sol. Si ces pratiques étaient théoriquement adoptées sur l'ensemble des terres cultivées de la planète, il serait probablement possible de séquestrer entre 5% et 15% du dioxyde de carbone émis par la combustion des carburants fossiles, ce qui compenserait en partie les émissions générées par les activités agricoles.⁷⁶¹

Enfin, il est important de souligner un autre aspect : les subventions agricoles ne devraient être versées qu'en échange de garanties sur la mise en œuvre de pratiques protégeant la santé des sols. L'agriculture européenne bénéficie d'énormes subventions, qui représentent environ un tiers des 180 milliards d'euros estimés en 2018 : en 2015, au moins 50 milliards d'euros ont été versés, aidant environ 7,5 millions d'exploitations. Selon certaines estimations, les subventions

accordées à l'agriculture et à l'élevage européens au cours de la période 2014-2020 se sont élevées à au moins 480 milliards d'euros.^{871, 985} Le soutien public à l'agriculture, qui est dominée par la monoculture chimique, est une forme d'encouragement direct de pratiques non durables telles que l'utilisation de pesticides. Les monocultures mono-successionnelles ne peuvent pas survivre sans pesticides et vice versa.

Le soutien économique de la production agricole avec des ressources publiques sans demander de garanties sur l'adoption de pratiques durables en contrepartie, participe, de manière non évidente, à la stratégie dominante dans les secteurs d'activité : socialiser les coûts et privatiser les gains.

C'est encore pire lorsque les subventions financent des pratiques prédatrices et non économiques telles que les incitations publiques à la production d'agro-carburants (méthane, éthanol, biodiesel) qui nécessitent l'occupation des terres par le maïs, le blé, la betterave à sucre et le colza.⁷⁴¹ L'Europe avait prévu de consacrer 7% des terres agricoles européennes à la production d'agrocarburants d'ici 2020.^{741, 871} Les monocultures et les systèmes de production d'énergie présentés comme utiles parce qu'ils sont classés comme renouvelables consomment en réalité plus d'énergie fossile que les agrocarburants et altèrent les sols et les eaux. Ce gaspillage devrait être vigoureusement combattu au lieu d'être financé par des ressources publiques importantes.

Un autre énorme gaspillage est celui des subventions aux combustibles fossiles (environ 6% du PIB mondial) et aux activités qui nuisent à l'environnement. N'oublions pas que les agriculteurs paient le diesel moins cher que le prix du marché. C'est une autre incitation à gaspiller l'énergie non renouvelable.

Un examen des principes qui sous-tendent une agriculture saine des sols montre que nous devons faire exactement le contraire de ce que fait habituellement l'agriculture industrielle et chimique. Le sol ne doit pas être traité comme une marchandise privée, sans restriction. La défense de la santé et de la fertilité des sols doit être considérée comme une priorité pour le bien public et doit donc être protégée par des stratégies et des objectifs nationaux.

L'EAU : UN BIEN PRÉCIEUX À PRÉSERVER

L'EAU, UN DROIT UNIVERSEL, PAS UNE MARCHANDISE

Les deux tiers de la planète sont recouverts d'eau, et notre corps est en grande partie constitué de cette substance indispensable et de plus en plus précieuse (l'embryon humain contient 94% d'eau, à la naissance cette teneur tombe à 77% et diminue au cours de la vie pour atteindre environ la moitié du poids du corps).⁹⁷⁹ À l'échelle de la planète, 70% de l'eau est utilisée pour la nutrition, 22% pour la production d'objets et de matériaux et le reste pour l'usage domestique.

Dans les pays aux économies avancées, comme l'Italie ou les États-Unis, au moins 45% de la demande totale en eau est utilisée dans le secteur industriel ; en Italie, par ordre décroissant, pour les produits chimiques, le caoutchouc et les plastiques, le fer et l'acier et les métaux de base, le papier et les produits du papier, et les textiles. En Europe, au moins 52% de l'eau est utilisée dans l'industrie, 32% dans l'agriculture et 15% pour l'usage domestique ; dans les pays émergents, jusqu'à 98% de l'eau prélevée est utilisée pour satisfaire l'agriculture.⁹⁷⁹ On estime qu'au moins un milliard d'êtres humains n'ont pas accès à l'eau potable et qu'au moins deux fois plus ne disposent pas d'installations sanitaires de base (la dysenterie tue plus d'enfants dans le monde que le sida, le paludisme et la tuberculose réunis).

La réduction de la disponibilité de l'eau, la pollution de cette ressource et la modification de son cycle (par exemple, en raison du changement climatique) sont quelques-uns des signes qui nous avertissent que l'espace de fonctionnement sûr pour l'humanité a été dépassé. L'utilisation de l'eau au niveau planétaire est sans précédent : en moyenne, plus de 3.350 litres sont utilisés par habitant et par jour. En Italie, l'empreinte globale de la consommation d'eau est de plus de 6.300 litres par habitant et par jour (cette estimation inclut l'utilisation nécessaire pour soutenir les importations). L'Italie figure parmi les plus grands importateurs d'eau virtuelle au monde, et la majeure partie de l'empreinte hydrique est imputable à la production alimentaire. Ces niveaux de consommation soulignent que nous ne sommes pas dans un espace de fonctionnement sûr, car ils ne sont pas viables.

En moyenne, un citoyen européen consomme 700 mètres cubes d'eau par an, un Américain 1.280. Au fil du temps, on a assisté à une réduction de la disponibilité de l'eau, tant au niveau planétaire qu'en Italie : la disponibilité mondiale par habitant est passée de 9.000 mètres cubes dans les années 1990 à 5.921 mètres cubes en 2018, et pourrait descendre en dessous de 5.000 mètres cubes vers 2025 ; en Italie, la disponibilité est passée de 3.587 mètres cubes par habitant et par an en 1962, à moins de 3.000 en 2018 (en Italie, la consommation moyenne par habitant est de 6.400 L par jour, ce qui correspond approximativement à 2.334 mètres cubes par an ; plus de 50% de cette eau virtuelle provient de l'étranger).⁹⁷⁹ La majeure partie de l'eau douce disponible est prélevée en Italie et il est important de souligner qu'elle retourne polluée dans l'environnement. Face à la réduction de la disponibilité, les prévisions annoncent une augmentation de la demande en eau au cours des prochaines décennies, de sorte qu'elle est appelée à devenir de plus en plus précieuse. Les principales raisons de cette croissance de la demande sont la croissance démographique et l'augmentation de la consommation, notamment dans les pays émergents.

Entre 2012 et 2017, au moins 40% des céréales cultivées sur la planète ont été utilisées pour nourrir les animaux et, en même temps, la production de viande a presque doublé entre 1980 et 2004. L'empreinte hydrique moyenne par calorie du bœuf est au moins 20 fois plus importante que celle des céréales et autres légumes. Avec quelles ressources en eau (et en sol) sera-t-il

possible de soutenir le doublement de la production de viande que certaines organisations espèrent atteindre d'ici 2050 ? Les prévisions sur la consommation de céréales estiment également une augmentation d'au moins 30% avant 2050.

Les autres causes de la réduction de la disponibilité de l'eau sont la sécheresse (l'eau évaporée du sol et transpirée par les plantes est plus abondante que celle reçue par les précipitations) et le changement climatique. Ce dernier se manifeste davantage dans les endroits les plus froids et les plus inhospitaliers de la planète. Au cours des 40 dernières années, la fonte des calottes polaires s'est accélérée (elle a été multipliée par 4 en 10 ans, de 2003 à 2013). Un tiers de la population européenne vit à moins de 50 km de la côte. Il est donc possible que l'élévation du niveau des océans engendre des coûts et des conditions défavorables pour beaucoup. Le niveau des mers pourrait s'élever de 4 à 6 mètres avant la fin du siècle ; des villes comme Londres, New York, Venise, Shanghai, Bangkok, Copenhague et Amsterdam seront gravement touchées par une élévation d'un seul mètre. Même les glaciers des Alpes italiennes ont perdu plus de la moitié de leur surface en un siècle. En 2100, les Alpes pourraient être totalement dépourvues de glaciers.

Il est facile de prévoir une augmentation des litiges concernant l'appropriation de l'eau disponible. Il se pourrait qu'avant le milieu de ce siècle, plus de 60% de la population mondiale se trouve en situation de pénurie d'eau par rapport à la demande. En 2018, un centre urbain de plus de 3,7 millions d'habitants (Le Cap, en Afrique du Sud) est devenu tristement célèbre pour avoir été privé d'eau. Un autre exemple frappant est celui de la mer d'Aral (un lac salé situé entre l'Ouzbékistan et le Kazakhstan), qui, en 1960, était le quatrième plus grand lac du monde, mais qui ne figure même plus parmi les 50 premiers : en 2007, sa superficie n'était plus que de 10% de sa taille initiale et sa salinité avait dépassé 100 g/L, entraînant la mort de la plupart des organismes (à titre de comparaison, la salinité marine est d'environ 35 g/L). L'une des causes de la réduction de la mer d'Aral est l'irrigation du coton : en moins de 50 ans, la surface du lac, qui était constante depuis plus de 11000 ans, a été inexorablement réduite avec des changements irréversibles.⁹⁸⁵

La production d'énergie dépend également de la disponibilité de l'eau, et des coupures de courant ont déjà été enregistrées en raison de pénuries d'eau : par exemple, en 2012, 620 millions de personnes (10% de la population mondiale) ont été privées d'électricité en Inde.⁹⁷⁹ Dans le monde, entre 4 et 13% de la consommation d'électricité est utilisée pour gérer l'eau (prélèvement, transport, épuration).

Parmi les solutions non durables figure l'augmentation de la consommation d'eau en bouteille (de 7% par an dans le monde) qui coûte des centaines de fois plus cher que l'eau du robinet (les entreprises paient des frais d'embouteillage qui s'élèvent tout au plus à quelques millièmes d'euro par litre).

Ces quelques chiffres suggèrent facilement une relation entre l'alimentation, les besoins en eau et les situations de crise potentielles : la majeure partie de l'eau utilisée dans un pays du monde provient d'un pays voisin ou est importée ; par exemple, la Chine compte plus de 20% de la population mondiale mais environ 6% de l'approvisionnement mondial en eau douce. En 2018, il y a eu au moins 75 conflits armés autour de l'eau dans le Monde ; il y en a eu au moins 263 entre 2010 et 2018 ; il s'agit notamment de conflits dans le bassin du Nil, le bassin du Cauvery en Inde, le conflit autour du Tigre et de l'Euphrate, le conflit entre la Turquie et l'Arménie : certains de ces conflits durent depuis des décennies.⁹⁷⁹ Dans certains cas, les pénuries d'eau ne sont pas la cause de la guerre, mais l'eau est prise à l'ennemi comme objectif militaire. Avant le milieu de ce siècle, deux tiers de la population mondiale pourraient connaître des pénuries d'eau, ce qui peut être considéré comme un puissant moteur de conflits et de guerres. Heureusement, la pénurie d'eau est souvent gérée de manière pacifique : entre 1946 et 1999, 1.931 conflits liés à l'eau ont été enregistrés, dont 67% ont été réglés de manière pacifique, avec une coopération.⁹⁸⁸

Il n'y a qu'une seule solution : réduire la consommation et les déchets et, ensuite, recycler et réutiliser.

LE CYCLE DE L'EAU

La circulation de l'eau dans les plantes et les écosystèmes est le plus important transfert d'énergie à médiation chimique de la biosphère. Les plantes sont capables d'assimiler l'eau par les racines et de la transporter le long de la tige jusqu'aux feuilles, où elle est renvoyée dans l'atmosphère sous forme de vapeur d'eau à travers les stomates (minuscules pores à la surface des feuilles). La quantité d'eau que les plantes peuvent extraire du sol est considérable. Une feuille peut transpirer environ 0,2 litre d'eau par jour, un arbre environ 200 litres par jour et un hectare de forêt plus de 10.000 L par jour.⁶²⁴ Le transport de l'eau et l'évaporation qui s'ensuit sont des processus thermodynamiques qui nécessitent de grandes quantités d'énergie : 0,6 kcal sont nécessaires pour évaporer 1 g d'eau. Les écosystèmes de la Terre peuvent être considérés comme de gigantesques machines thermodynamiques silencieuses, capables de transformer jour après jour d'importantes quantités d'énergie. L'énergie qui alimente tout cela est toujours l'énergie solaire, qui est absorbée par les plantes et utilisée dans divers processus, notamment la transpiration et la photosynthèse.

Par la transpiration des plantes, l'évaporation et les précipitations (ainsi que par les courants océaniques), l'eau transfère la majeure partie de l'énergie reçue du soleil des régions tropicales aux régions polaires, un peu comme un pipeline qui transfère la chaleur d'une chaudière aux différentes pièces d'une maison. Le mouvement de l'eau dans l'atmosphère détermine la répartition des précipitations sur la Terre et la disponibilité annuelle des ressources en eau et, par conséquent, la croissance et le développement des plantes et, plus généralement, les conditions favorables à la vie des organismes. Des précipitations trop importantes entraînent l'érosion et le transport de matières solides vers les océans.

Les quantités d'eau impliquées dans le cycle hydrologique mondial sont traditionnellement exprimées en unités de km³. La majeure partie de l'eau de la planète est contenue dans les océans ; moins de 3% est non salée et, de cette fraction, la plupart est gelée (73%), 20% se trouve dans les lacs : seule une petite fraction de l'eau douce est disponible pour le prélèvement.⁹⁷⁹ Les eaux fluviales (y compris les marais) et les eaux souterraines représentent respectivement environ 0,02% et 0,6% de l'eau présente.⁴²⁵ L'eau biologique représente moins de 0,3% de toute l'eau douce. Les océans, comme on peut facilement le deviner, sont les plus grands réservoirs d'eau de la planète : ils contiennent 1.400.000.000 km³, soit environ 97% de toute l'eau présente à la surface de la terre. La glace polaire et les glaciers continentaux, avec 27.900.000 km³, fournissent la deuxième plus grande contribution à notre approvisionnement en eau. Le sol contient environ 122.000 km³ d'eau, dont environ 48% se trouvent dans la zone des racines des plantes. Les besoins humains sont satisfaits par une quantité d'eau relativement faible, contenue dans les lacs et les rivières ; l'eau présente dans les nappes phréatiques n'est pas facile à estimer : probablement entre 4.000.000 et 16.000.000 km³. L'atmosphère contient 0,04% de l'eau totale non salée.⁸⁸⁰ L'humanité dispose de très peu d'eau : moins de 1% de toute l'eau disponible, soit environ 200.000 km³.

La quantité d'eau dans l'atmosphère est relativement faible (environ 13.000 km³), mais de grandes quantités d'eau se déplacent en raison des échanges d'énergie à la surface. L'eau est continuellement renouvelée par les précipitations : 110.000 km³ d'eau tombent sur la surface de la terre chaque année. 59 à 64% de cette eau s'évaporent immédiatement ou sont transpirés par les plantes, tandis que 36% atteignent la mer via les cours d'eau de surface et souterrains. L'évaporation retire chaque année environ 500.000 km³ d'eau des océans, dont plus de 90% reviennent sous forme de précipitations.⁹⁷⁹ Nous pouvons en déduire que le temps de séjour

moyen de l'eau dans les océans est d'environ 3.000 ans. Seule une partie de cette eau, environ 400.000 km³/an, retourne aux océans sous forme de précipitations ; le reste, soit 40.000 km³/an, est transféré sous forme de vapeur d'eau à la surface de la terre. ⁶²⁴

Sur les continents, les précipitations annuelles moyennes sont de 700 mm, ce qui correspond à 7 millions de L/ha/an : moins que ce dont le maïs a besoin pendant les mois où il pousse et qui, sous nos latitudes, sont les plus chauds. ⁴²⁵ Au cours de la période 1996-2005, l'empreinte hydrique mondiale, c'est-à-dire la quantité d'eau utilisée par l'homme, était d'au moins 9.087 kilomètres cubes par an. ⁵

Les plantes sont capables d'absorber l'eau par leurs racines et de la renvoyer dans l'atmosphère sous forme de vapeur : ce processus est appelé transpiration. La combinaison de la transpiration et de l'évaporation, qui se produit en présence de surfaces humides, est appelée évapotranspiration, un terme utilisé pour décrire le flux d'eau des surfaces végétales vers l'atmosphère. Le déplacement de l'eau dû à l'évapotranspiration des terres s'élève à environ 70.000 km³/an, ce qui, ajouté aux 40.000 km³/an provenant des océans, donne des précipitations terrestres de 111.000 km³/an. Cette valeur témoigne de la grande importance de la végétation terrestre dans le recyclage de l'eau de l'atmosphère. Le temps de séjour moyen de l'eau provenant de l'évapotranspiration dans l'atmosphère est beaucoup plus court que celui de l'eau provenant des océans. Ces données montrent que les écosystèmes terrestres jouent un rôle crucial dans le cycle de l'eau et les transformations énergétiques associées. Par conséquent, si la couverture végétale est réduite, les précipitations sont également réduites, ce qui modifie les conditions de vie de nombreuses espèces.

La vapeur d'eau se trouve en proportions variables au-dessous de 12 à 15 km dans l'atmosphère, en fonction des processus d'évaporation et de condensation. Un kilogramme d'air à une température de 0°C contient moins de 4 g de vapeur d'eau pour une humidité relative de 100%, alors qu'à +30°C, il en contient environ 28 g. En augmentant la température de 30 degrés, la quantité d'eau est multipliée par sept et, par conséquent, l'énergie qui peut être libérée. C'est pourquoi la glace des pôles est un grand désert gelé. L'air à +40°C contient 470 fois plus d'eau que l'air à -40°C, tandis que l'air à +30°C contient jusqu'à quatre fois plus d'humidité que l'air à +10°C. En général, on peut considérer que chaque augmentation de 1°C de la température de l'atmosphère entraîne une augmentation de 7% de la capacité de l'atmosphère à retenir l'humidité. ⁴²³ Ainsi, l'augmentation de la température de l'air entraîne des changements tels qu'une augmentation de l'intensité des précipitations et de la quantité d'eau contenue dans l'atmosphère : le carburant des ouragans. ⁶⁴²

L'EAU ET L'AGRICULTURE

La planète est menacée par une crise de l'eau car il s'agit d'une ressource limitée et en raison de la pollution de plus en plus répandue des ressources en eau. La demande mondiale en eau double environ tous les 20 ans et, en 1995, quatre-vingts pays, représentant 40% de la population mondiale, étaient déjà touchés par des pénuries d'eau. ⁸⁴⁷ La disponibilité de l'eau par habitant diminue très rapidement avec la croissance démographique : de 16.800 m³/habitant/an en 1950 à une probable 4.800 m³/habitant/an en 2025. ¹⁵ Ce problème affecte aussi gravement le bassin méditerranéen et l'Italie. Avant la fin du siècle, le débit des rivières européennes pourrait être réduit de plus de 40% en moyenne, avec des conséquences néfastes pour l'agriculture. ⁹⁸⁵

La planète dans son ensemble connaît une crise de l'eau. Au moins 18 pays, où vit la moitié de la population mondiale, sont en train d'assécher leurs aquifères. Plus de 60% des rivières de la planète ont été modifiées par des barrages et, entre 1900 et 2000, 70% des zones humides ont été détruites ou modifiées de manière irréversible. Il existe au moins 900.000 barrages dans le

monde, dont plus de 40.000 sont de grande taille (le premier barrage a probablement été construit en Égypte en 3000 avant J.-C.).^{736, 979}

L'humanité s'est déjà approprié plus d'un tiers de la production générée par les écosystèmes et au moins 50% de l'eau douce utilisable. Il est probable qu'un milliard d'hectares d'écosystèmes naturels seront convertis à des fins agricoles avant 2050, ce qui aura pour effet de multiplier par deux ou trois la répartition de l'azote et du phosphore dans l'environnement.⁶⁰⁴ Cette augmentation va exacerber de nombreux problèmes existants tels que l'eutrophisation, la réduction de la biodiversité et l'augmentation des problèmes de santé.

L'agriculture est le plus grand utilisateur d'eau douce de la planète, qui revient contaminée. On estime que 70% de toute l'eau non salée prélevée dans les rivières et les aquifères dans le monde est utilisée pour l'agriculture, en particulier l'irrigation.^{776, 851} En Europe, au moins 25% de l'eau prélevée est utilisée à des fins d'irrigation ; ce chiffre atteint 55% dans le sud de l'Europe.⁸⁷¹ Un modèle exemplaire de gaspillage d'eau est celui des agrocarburants : pour produire un litre d'agrocarburant, il faut entre 1.400 et 20.000 litres d'eau (eau virtuelle).^{736, 741}

D'ici 2050, les terres agricoles irriguées dans le monde pourraient être multipliées par 1,9 : de 280 millions d'hectares en 2000 à plus de 529 millions d'hectares en 2050.⁶⁰⁴ L'augmentation de l'irrigation accroît non seulement l'eutrophisation mais aussi la contamination de l'eau et aggrave le problème de la salinisation. L'irrigation, combinée à l'utilisation accrue d'engrais azotés et phosphorés, contamine l'eau potable (par exemple, les nitrates et les nitrites), accroît les émissions de gaz à effet de serre (par exemple, les oxydes d'azote), acidifie les sols et augmente l'ozone troposphérique. L'irrigation, les pesticides et la fertilisation génèrent une pollution de l'eau et une grave réduction de la biodiversité. Les retours de l'agriculture utilisent une eau contaminée par des engrais, des pesticides, des médicaments et, dans certains cas, des plastiques ou des substances contenues dans ces derniers. L'utilisation de pesticides pourrait être multipliée par 2,7 (fourchette de 1,9 à 4,8) d'ici 2050 : de 3,8 millions de tonnes produites en 2000 à 10,1 en 2050.⁶⁰⁴

Un régime alimentaire riche en aliments d'origine animale nécessite 10 à 20 fois plus d'eau qu'une consommation de légumes pour les mêmes calories. Si l'humanité, au lieu d'utiliser des terres pour nourrir plus de 70 milliards d'animaux, utilisait la même superficie pour un régime végétarien, il serait probablement possible de nourrir 4 milliards d'êtres humains supplémentaires. Le régime alimentaire basé sur les produits animaux est très inefficace : moins de 10% de l'énergie contenue dans les légumes peut être convertie en calories utilisables dans les aliments d'origine animale, et il y a également un grand gaspillage d'eau : 15.000 L pour un kilo de steak de bœuf.

Une conséquence dévastatrice est que 25% des fleuves les plus importants du monde n'ont plus assez d'eau pour maintenir un niveau écologique acceptable et ne peuvent plus atteindre les océans, en raison de périodes de pénurie alarmantes. La consommation d'eau pourrait augmenter de plus d'un tiers avant 2050, ce qui aggraverait la situation actuelle de manière irréversible.⁸⁵¹

Comment pouvons-nous espérer continuer à ne pas nous soucier des limites d'une planète finie ? Les prochaines années verront probablement la dernière augmentation massive de la production agricole pour répondre aux réglementations économiques : entre 8,5 et 10 milliards d'habitants sont attendus en 2050. Cette augmentation sera suivie d'une réduction car les ressources rares de la planète sont régies par des lois financières dans le sens inverse de celui souhaité. En raison de la capacité insuffisante à traduire les connaissances scientifiques en actions, telles que celles visant à accroître la capacité d'adaptation aux catastrophes et à réduire la vitesse des changements désastreux que nous générons, des opportunités sont perdues. La diffusion et la communication peuvent probablement susciter la prise de conscience nécessaire pour activer le changement.

AZOTE, PHOSPHORE ET EUTROPHISATION

La présence de nitrates et de phosphates dans les eaux de surface et les eaux souterraines constitue un problème environnemental majeur, car ils sont responsables de l'eutrophisation. L'eutrophisation est un processus de dégénérescence de l'écosystème aquatique dû à un enrichissement excessif en nutriments. L'une des principales causes est l'agriculture, qui utilise des engrais pour distribuer dans l'environnement beaucoup plus d'azote que les plantes ne sont capables d'en absorber. Cet excès de nutriments ne pollue pas seulement l'environnement mais perturbe également de nombreux équilibres, par exemple en favorisant les plantes nitrophiles. Au moins un quart des rivières européennes et plus d'un tiers des lacs présentent des signes d'eutrophisation, c'est-à-dire qu'ils manquent d'oxygène.⁹⁸⁵

Dans les écosystèmes aquatiques, si la teneur en oxygène est excessivement réduite en raison de la décomposition des plantes mortes, cela peut entraîner l'extinction des différentes formes de vie présentes. Ce phénomène est connu sous le nom d'eutrophisation. La distribution de composés azotés tels que l'ammoniac favorise la fertilisation des écosystèmes, l'eutrophisation et l'acidification. On observe également une augmentation de la dénitrification et une augmentation de la production d'oxyde nitreux (N₂O), qui est un puissant gaz à effet de serre. Le protoxyde d'azote qui atteint la stratosphère est transformé en d'autres oxydes d'azote, ce qui entraîne la destruction de la couche d'ozone.

Une eau de surface peut être considérée comme altérée, et donc à risque d'eutrophisation, si elle contient plus de 40 mg/l de nitrate (NO₃), plus de 2 mg/l de phosphate (exprimé en orthophosphate), plus de 1 mg/l de phosphore total et plus de 75 µg/l de chlorophylle (indiquant une croissance des algues). L'Organisation mondiale de la santé conseille de ne pas dépasser 45 mg/l de nitrates dans l'eau potable, mais 10 mg/l peuvent déjà générer des effets négatifs sur la santé.^{52, 114}

Le facteur le plus important qui peut conduire à l'enrichissement en nitrates des eaux souterraines est l'utilisation d'engrais synthétiques et d'effluents d'élevage dans l'agriculture. Les rejets des égouts et des stations d'épuration augmentent également la probabilité de détecter des concentrations élevées de nitrates et d'autres contaminants.

Les effets négatifs des nitrates sur la santé comprennent la production de méthémoglobine (hémoglobine qui perd sa capacité à fixer l'oxygène de manière réversible), les fausses couches et le cancer de l'estomac.^{114, 147} Un taux de méthémoglobine de 10% est suffisant pour provoquer une cyanose (syndrome du bébé bleu). Les nitrates sont également impliqués dans la formation de composés cancérigènes (N-nitrosamines et N-nitrosamides), qui se forment dans l'estomac. Il est désormais établi que les nitrates sont cancérigènes non seulement pour l'homme mais aussi pour au moins 40 autres espèces animales, de sorte que l'on peut dire qu'ils portent atteinte à la biosphère.¹⁴⁷

Les composés azotés sont en partie dérivés du fumier utilisé comme engrais et en partie produits chimiquement comme engrais de synthèse. Le procédé de synthèse des engrais azotés porte le nom de son inventeur, Haber, qui a reçu le prix Nobel en 1918, et de Bosch, qui a lancé sa production industrielle (procédé chimique Haber-Bosch). Les composés azotés synthétiques (produits à partir de l'azote diatomique, qui est le principal gaz atmosphérique, c'est-à-dire 78% de l'air que nous respirons) représentent au moins 40% de tout l'azote utilisé dans les cultures.¹¹⁴ La production d'engrais chimiques, comme l'ammoniac, est passée de 4 millions de tonnes en 1940 à 150 millions de tonnes en 1990. Il convient de remarquer qu'il faut au moins trois tonnes de combustibles fossiles pour produire une tonne d'engrais.

L'agriculture moderne a modifié le cycle normal de l'azote, augmentant considérablement le flux vers le sol cultivé. Les émissions atmosphériques peuvent également être un facteur important. Les émissions anthropiques d'azote réduisent la biodiversité et favorisent l'acidification et l'eutrophisation des écosystèmes.⁹⁰⁷

Les animaux mangent de grandes quantités de phosphore et, comme pour l'azote, seule une fraction est retenue, tandis que la majeure partie est excrétée dans le fumier. Le phosphore est impliqué dans plusieurs fonctions importantes telles que la croissance osseuse, la sécrétion du lait, le métabolisme énergétique, la synthèse et le transport des lipides, le métabolisme des protéines et la construction de l'ADN. La majeure partie du phosphore ingéré avec les aliments pour animaux (qui sont souvent importés) ne sera pas exportée avec la viande et le lait, mais restera dans la région où se trouve l'exploitation, ce qui entraîne des problèmes tels que l'eutrophisation des eaux. Les exploitations d'élevage contribuent à la contamination de l'eau par des composés phosphorés : entre 7 et 48% de tous les composés phosphorés présents dans les eaux de surface sont générés par les exploitations d'élevage.⁹⁰⁸ Une grande partie du phosphore distribué dans l'environnement provient des engrais minéraux.

Le phosphore est facilement lessivé du sol par la pluie ou l'irrigation, pour être transporté dans les eaux de surface et les eaux profondes. Il peut donc également poser des problèmes pour l'eau potable. L'accumulation d'éléments tels que le phosphore dans les eaux de surface et dans la mer provoque la prolifération d'algues microscopiques qui, à leur tour, ne sont pas consommées par les consommateurs primaires, ce qui entraîne une augmentation de l'activité bactérienne. Cela augmente la consommation d'oxygène, conduit à des conditions de concentration d'oxygène insuffisante et, à long terme, entraîne la mort des poissons. Enfin, l'eau peut être colorée et malodorante.

HORMONES STÉROÏDIENNES DANS L'EAU

Les animaux, y compris les humains, libèrent des hormones stéroïdiennes dans l'environnement par le biais des fèces et de l'urine : entre 0,02 et 2,3 milligrammes par animal et par jour. En un an, un être humain produit plus de 500 litres d'urine. Entre 110 mg et 990 mg d'hormones sont excrétés par an par les vaches, entre 43 et 830 mg par an par les porcs.⁹¹⁵

De nombreux pays dans le monde ont autorisé l'utilisation de certaines hormones dans la production animale. Parmi les plus utilisés, on trouve l'œstradiol (œstrogène), la progestérone et la testostérone. Il existe également des molécules de synthèse comme le zéranol, l'acétate de mélangestrol et l'acétate de trenbolone. Certains antibiotiques sont utilisés pour leur effet de stimulation de la croissance, plutôt que comme antimicrobiens. Les hormones sont utilisées parce qu'elles produisent plusieurs effets souhaités, comme l'accélération du taux de gain de poids quotidien, jusqu'à 25% de plus chez les bovins.¹¹⁴

Chez les ruminants, les œstrogènes sont principalement sécrétés dans les fèces, alors que chez les porcs, ils sont sécrétés dans l'urine. Ces hormones finissent, directement ou indirectement, dans l'environnement (par exemple, le fumier et les boues d'épuration, utilisés comme engrais). Un effet mesuré de cette distribution dans l'environnement est la féminisation des poissons mâles, qui peut être induite par des concentrations de 1 ng/L (c'est-à-dire une partie par milliard). Cela signifie que 2,3 mg, c'est-à-dire la quantité qui peut être libérée quotidiennement dans les excréments d'animaux tels que les porcs, est la dose potentiellement suffisante pour causer des problèmes à plus de 2.000.000 de poissons par jour. On a calculé qu'en 2000, l'élevage a rejeté 49 tonnes d'œstrogènes dans l'environnement aux États-Unis et 33 tonnes dans l'Union européenne.⁹¹⁵ Cette contamination chimique peut avoir des effets dévastateurs car ces molécules altèrent de nombreuses fonctions chez les animaux à des concentrations infinitésimales.

Des recherches portant sur la présence de diverses substances, dont des hormones stéroïdiennes, dans le Danube et ses affluents, ont révélé la présence d'œstrone (après la ménopause, c'est l'œstrogène le plus couramment produit, et son activité est plus faible que celle de l'œstradiol) à des concentrations allant jusqu'à 71 ng/L.⁹¹⁶

En conclusion, le rejet des eaux usées et l'épandage d'engrais, tels que les boues, le fumier ou leurs digestats, libèrent dans l'environnement des hormones qui peuvent affecter la faune, notamment aquatique. Les hormones, si elles se retrouvent dans la chaîne alimentaire humaine (par exemple dans l'eau potable), peuvent générer de nombreux effets néfastes pour la santé. Cette possibilité est facilitée par la présence d'élevages sans terre qui, dans des zones de plus en plus urbanisées, sont contraints de déverser le fumier directement dans les cours d'eau et en quantités excessives par rapport à leur capacité d'épuration naturelle.

LA CONTAMINATION PAR LES ANTIBIOTIQUES

Les antibiotiques sont des molécules produites naturellement par de nombreux micro-organismes tels que *Bacillus*, *Cephalosporium*, *Penicillium*, *Pleurotus* et *Streptomyces*. Les chercheurs sont partis de molécules naturelles pour concevoir et produire des molécules similaires pouvant être utilisées comme médicaments. Dans les pays industrialisés, les médicaments utilisés dans l'élevage des animaux représentent une proportion élevée du total national. Par exemple, aux États-Unis, plus de 70% des antibiotiques commercialisés sont administrés aux animaux d'élevage. Une part importante des médicaments administrés n'est pas absorbée par l'animal et s'infiltré dans l'eau via les effluents ou sur le sol. La contamination de l'eau par des agents antimicrobiens entraîne la sélection d'une résistance aux antibiotiques chez les bactéries, tandis que la présence de substances hormonales dissoutes peut affecter les cultures et provoquer des perturbations endocriniennes chez l'homme et les animaux sauvages (certaines molécules ont à la fois une activité antibiotique et hormonale).

Les antibiotiques peuvent être presque entièrement éliminés dans les fèces et les urines, sans être métabolisés. On estime que 75% des antibiotiques ne sont pas absorbés par les animaux, mais sont excrétés dans les fèces.⁸⁹⁹ Les tétracyclines sont excrétées à hauteur de 25% de la dose orale dans les fèces et entre 50 et 60% de la dose orale dans les urines, soit sous leur forme originale, soit sous forme de métabolite actif.⁹⁰⁰ Les informations sur le devenir des antibiotiques dans certains cas sont limitées et certaines études ont estimé les temps de demi-vie des antibiotiques dans le fumier : 100 jours pour les tétracyclines, 30 jours pour les aminoglucosides et entre 8 et 30 jours pour les sulfamides.⁹⁰¹ Les antibiotiques distribués avec le fumier peuvent se retrouver dans les couches supérieures du sol à des concentrations supérieures à 150 µg/kg, dans le cas des tétracyclines (la concentration dans le lisier était de 4 mg/kg).^{902, 903} L'épandage de fumier permet de distribuer 330 g de tétracyclines, 7 g de chlortétracyclines, 28 g de sulfaméthazine et 57 g de sulfadiazine sur un hectare par an.⁹⁰²

Plusieurs études montrent la présence d'antibiotiques dans les eaux de surface et les eaux profondes à proximité des exploitations d'élevage : jusqu'à 67% des échantillons d'eau prélevés près des exploitations de porcs et de poulets étaient contaminés.⁹⁰⁴ La sulfaméthazine a été trouvée dans les eaux souterraines à 1,4 m de profondeur.⁹⁰² Des micro-organismes possédant des gènes de résistance aux antibiotiques ont été trouvés dans les sols contaminés par les antibiotiques contenus dans le fumier.⁹⁰⁵

L'utilisation massive d'antibiotiques, notamment dans l'élevage, a pour effet secondaire de favoriser l'émergence de micro-organismes résistants. Ces bactéries renforcées, qui se propagent principalement par l'eau, sont à l'origine d'infections graves, souvent incurables. En raison de l'utilisation accrue de ces médicaments, il est probable que d'ici 2050, le nombre de décès dus à des infections incurables pourrait atteindre plus de 300 millions.⁹⁷⁹

LES PESTICIDES CONTAMINENT DANGEREUSEMENT L'EAU

Personne ne sait exactement combien de produits chimiques sont libérés dans l'environnement par les activités humaines. Pour avoir un chiffre de référence auquel réfléchir, on estime qu'au moins 1,5 million de tonnes de substances chimiques persistantes, bioaccumulables et toxiques (cancérogènes, perturbateurs endocriniens, etc.) sont rejetées chaque année en Amérique du Nord : il s'agit de substances qui manifestent des effets biologiques néfastes chez les êtres vivants à des doses de millièmes de gramme ou moins. Nous rejetons des millions de tonnes de substances biologiquement actives à très faible dose et qui sont persistantes et bioaccumulables. Nous menons donc une expérience sans précédent d'empoisonnement global de la biosphère. Certaines des conséquences catastrophiques sont liées au fait que les océans sont plus chauds, plus acides, moins riches en oxygène, moins productifs, plus pollués et moins couverts de glace : malheureusement, ces indicateurs négatifs ne peuvent que s'aggraver.

Les observateurs environnementaux du monde entier signalent la présence alarmante de pesticides dans l'eau. Les concentrations enregistrées dépassent souvent les niveaux de sécurité réglementés par les autorités, et il convient de souligner qu'il n'existe pas de concentration à laquelle aucun effet nocif n'est mesuré. Les valeurs limites sont donc le résultat d'évaluations économiques et de choix politiques.

Les insecticides sont parmi les pesticides les plus utilisés en agriculture et ont été associés à un certain nombre de problèmes, tels que l'émergence d'organismes cibles résistants. Au fil du temps, de nouvelles catégories de molécules sont apparues sur les marchés, qui ont toujours été plus toxiques que leurs prédécesseurs. Le tableau ci-dessous résume certaines de ces informations.¹²⁶⁵

Catégorie d'insecticide ¹²⁶⁵	Année d'introduction sur le marché	Pourcentage du marché des pesticides (1990-2008)	Année d'enregistrement de l'émergence d'organismes cibles résistants	Quantité utilisée en grammes par hectare	Concentrations maximales mesurées dans les eaux de surface*	Concentrations maximales enregistrées dans les sédiments:**
Organo-chlorés	1940	-	1946	1.000-4.000	6,3 mg/L	52,4 mg/kg
Organophosphates	1950	59%	1965	50-2.000	9 mg/L	20,4 mg/kg
Carbamates	1962	24%	1972	10-200	-	-
Pyréthroïdes	1973	18%	1978	10-200	0,25 mg/L	10,6 mg/kg
Néonicotinoïdes**	1991	23%	1995	10-100	0,32 mg/L	-

* Données provenant de 8.166 mesures effectuées sur 2.500 sites dans 73 pays du monde.

** Données provenant de 3.134 mesures effectuées sur 2.500 sites dans 73 pays du monde.

*** L'acétamipride peut être retrouvé dans les eaux de surface à une concentration maximale de 44 µg/L et l'imidaclopride à 225 µg/L.

Ces données mettent en évidence la sélection dangereuse et rapide d'organismes résistants et l'augmentation de la toxicité au fil du temps, ce qui permet d'utiliser de plus petites quantités. Les concentrations maximales enregistrées dans les eaux de surface de la planète constituent un fait alarmant. Elles dépassent de plus de 100 fois les doses auxquelles des effets négatifs sont certains dans ces écosystèmes fragiles.

Les conséquences de la contamination des eaux de surface par les pesticides sont sous-estimées. L'examen de plus de 800 études réalisées sur plus de 2.500 sites dans 73 pays confirme un risque potentiel : plus de 52% des 11.300 échantillons d'eau de surface prélevés dans le monde entier enregistrent la présence des 28 insecticides recherchés (pyréthroïdes, organochlorés et

organophosphorés ; 18 des 28 ingrédients actifs sont autorisés en Europe et 24 aux États-Unis).¹²⁶³ Certaines catégories de molécules, comme les pyréthroides, se retrouvent à des concentrations définitivement dangereuses pour les organismes aquatiques. Les concentrations de pesticides dans l'eau, équivalentes aux limites maximales autorisées par la réglementation, sont néanmoins capables de générer une réduction de la biodiversité : la richesse des macro-invertébrés diminue d'environ 30%.¹²⁶³ Globalement, plus de 40% des déterminations positives (52% des 11.300) enregistrent des concentrations d'insecticides supérieures aux concentrations maximales autorisées pour le pays concerné (54% aux États-Unis et 35% en Europe).¹²⁶³ Malheureusement, les insecticides peuvent se retrouver dans les eaux de surface à des concentrations des centaines de fois supérieures à celles réglementées par les lois sur la protection de l'environnement : dans ces cas, les dommages causés à la biodiversité seront beaucoup plus importants (une des limites est que chaque pays conçoit des règles différentes et, par conséquent, des seuils d'acceptabilité différents). Dans 82,5% des sédiments de la planète, on trouve des concentrations d'insecticides supérieures aux concentrations maximales réglementées.¹²⁶³ Cette exposition est également très nocive pour les organismes aquatiques.

La surveillance du niveau de contamination des eaux de surface par les insecticides sur 644 sites agricoles aux États-Unis (plus de 5.800 mesures) révèle la présence de substances actives à des concentrations supérieures aux niveaux maximaux stables dans 49,4% des échantillons.¹²⁶⁶

La découverte généralisée de pesticides dans les eaux de surface de la planète est un résultat facilement prévisible, étant donné que la production a augmenté de 750% entre 1955 et 2000 et que l'agriculture occupe au moins 40% de la surface. Les dommages que l'agriculture, par le biais des insecticides, cause aux organismes aquatiques sont sous-estimés ou inconnus. Autre aspect négatif, la plupart des contrôles ne permettent pas d'évaluer les concentrations maximales, c'est-à-dire les pics atteints lorsque les molécules sont libérées. Les pics de concentration peuvent générer des effets écologiques dévastateurs concentrés dans les quelques mois de l'année où la plupart des ingrédients actifs sont libérés : le printemps et l'été. Les molécules toxiques utilisées à grande échelle dans l'agriculture atteignent les eaux de surface et compromettent la biodiversité à l'échelle planétaire.

40% (174 millions d'hectares) de la superficie de l'Europe sont occupés par une agriculture utilisant des pesticides, ce qui compromet de manière irréversible les écosystèmes aquatiques : algues, micro-organismes, invertébrés et vertébrés. La législation et le processus d'autorisation n'ont pas permis d'empêcher la contamination irréversible de ces écosystèmes délicats. Au moins 66 insecticides, 42 herbicides et 27 fongicides (dans 608 échantillons) ont été trouvés dans les eaux de surface en Europe : 90% ont au moins deux résidus parmi ceux recherchés.¹²⁷³ La réglementation et le système de prévention et de contrôle n'ont pas permis de contenir la contamination chimique de l'environnement, comme ce fut le cas en Europe pour les résidus d'insecticides dans les eaux de surface : 45% des échantillons d'eau (sur 1.566 sites) enregistrent des concentrations supérieures aux niveaux maximaux recommandés.¹²⁷³ Dans les écosystèmes d'eau douce européens, des concentrations infinitésimales d'insecticides sont susceptibles de réduire la biodiversité d'au moins 29%.¹²⁷³ Nos connaissances ne nous permettent pas d'établir des concentrations auxquelles aucun effet négatif n'est mesuré dans les écosystèmes aquatiques ; cependant, les concentrations maximales acceptables suivantes pour certains insecticides dans les eaux de surface ont été établies en Europe (en µg/L) :¹²⁷³

- organochlorés : endosulfan 0,01 ;
- organophosphates : azinphos-méthyle 0,32 ; chlorpyrifos 0,1 ; malathion 1,25 ; parathion-éthyle 0,024 ; parathion-méthyle 0,073 ;
- carbamate : carbofuran 0,02 ;

- pyréthroïdes : acrinathrine 0,008 ; bifenthrine 0,005 ; cyfluthrine 0,0068 ; β -cyfluthrine 0,00068 ; cyperméthrine 0,0006 ; α -cyperméthrine 0,015 ; deltaméthrine 0,0032 ; esfenvalerate 0,01 ; fenvalerate 0,0022 ; λ -cyhalothrine 0,0021 ; perméthrine 0,025 ;
- néonicotinoïdes : acétamipride 0,5 ; imidaclopride 0,3 ; thiaclopride 1,57 ; thiaméthoxame 2,8.

Malheureusement, près de 45% des eaux de surface européennes présentent des concentrations d'insecticides supérieures à ces seuils réglementés sur le plan économique et politique (des concentrations allant jusqu'à 125.000 fois les valeurs seuils recommandées ont été enregistrées).

¹²⁷³ Un phénomène dangereux est que les masses d'eau de surface moins étendues présentent des concentrations plus élevées de résidus d'insecticides. Dans le cas des sédiments, 93% des 214 échantillons dépassaient les concentrations maximales recommandées, même de plus de 31.000 fois (les concentrations maximales recommandées dans les sédiments sont beaucoup plus élevées que celles des eaux de surface). ¹²⁷³ Dans les eaux de surface, tous les résultats concernant la cyperméthrine (29) étaient supérieurs au niveau de sécurité recommandé, dans le cas de l'endosulfan 73% (60) et dans le cas du chlorpyrifos 19% (57 résultats). Les pyréthroïdes sont la catégorie d'insecticides dépassant le plus fréquemment les concentrations maximales réglementées dans les eaux de surface : dans 70% des détections, les organophosphorés dans 38% et les néonicotinoïdes dans 24%. La situation est plus grave dans les sédiments : 100% des organophosphorés, 95% des pyréthroïdes et 90% des organophosphorés dépassent les concentrations maximales de sécurité réglementées (dans le cas des néonicotinoïdes, aucune concentration maximale recommandée n'a été établie jusqu'en 2015, année de publication de cet article scientifique). Ces données confirment le niveau élevé de contamination des eaux de surface en Europe :

1) 40% des échantillons de masses d'eau de surface enregistrent plus de 5 insecticides et jusqu'à 13 simultanément ;

2) L'interdiction de l'utilisation de certains insecticides n'a pas entraîné, au fil du temps, de réduction constatée de la concentration (les substances interdites sont utilisées) ;

3) La fraction des échantillons contenant des résidus d'insecticides a augmenté au fil des ans, exactement à l'inverse de ce que l'on devrait attendre de l'application des principes de sauvegarde ;

4) La fraction la moins abondante (environ 35%) des échantillons, qui ne présente pas de concentrations d'insecticides supérieures aux seuils réglementaires, est néanmoins contaminée par des molécules toxiques capables d'avoir des effets toxiques aigus et chroniques (les effets synergiques, cumulatifs et sublétaux sont inconnus).

Cela a de graves répercussions sur la biodiversité et sur la capacité à fournir des services écosystémiques essentiels tels que l'assainissement et l'approvisionnement en eau propre.

Les mesures de protection de l'environnement qui ont été dictées au fil du temps par de nombreuses réglementations européennes n'ont pas permis de réduire la contamination de l'environnement. Les études et les observations confirment que la situation s'aggrave : la contamination de l'eau par les insecticides augmente et d'autres facteurs tels que le changement climatique vont aggraver la situation (par exemple, le réchauffement de la planète pourrait entraîner une utilisation accrue des insecticides). Les évaluations des risques réalisées avant la mise sur le marché des insecticides ne peuvent pas protéger notre santé et celle des générations futures. Des alternatives à l'agriculture chimique doivent être conçues.

Les pesticides sont également utilisés dans les environnements urbains : en 2012, 48 millions de kilogrammes de substances actives ont été distribués dans les jardins, les maisons (y compris à l'intérieur), les rues, les zones commerciales et industrielles aux États-Unis (34% des dépenses en pesticides aux États-Unis sont non agricoles). ¹²⁶⁶ Ainsi, une grande partie de ce qui est distribué pour des utilisations non agricoles contamine les eaux de surface urbaines. Les quantités de matières actives distribuées par unité de surface, dans certains milieux urbains,

peuvent être élevées (jusqu'à 1.300 kg d'insecticides par km²), de sorte que les eaux de surface urbaines sont contaminées.¹²⁶⁶

L'examen des résultats de 10 755 mesures de la concentration de substances actives dans les eaux de surface et les sédiments sur 609 sites urbains aux États-Unis confirme un niveau de risque élevé pour la vie aquatique :¹²⁶⁶

- Les pesticides les plus fréquemment retrouvés dans l'eau étaient : atrazine (herbicide), diazinon (insecticide organophosphoré), simazine (herbicide), prometon (herbicide de la famille des triazines, comme ci-dessus), métolachlore (herbicide), fipronil (insecticide), chlorpyrifos (insecticide organophosphoré), tebuthiuron (insecticide organophosphoré), bifenthrine (insecticide pyréthroïde), fipronil desulfinyl (molécule dérivée du fipronil), 2,4-D (herbicide), diuron (herbicide).
- En plus d'être les molécules les plus facilement trouvées, les herbicides ont également enregistré les concentrations les plus élevées : jusqu'à 1,58 mg/L (le 2,4D et le diuron ont enregistré une concentration médiane de plus de 100 ng/L).
- L'examen de sédiments prélevés sur 352 sites urbains (1.655 mesures) dans différents États des États-Unis révèle la présence de nombreuses molécules. Les substances les plus fréquemment retrouvées sont : le chlordane (insecticide organochloré), le DDT (insecticide organochloré dont la concentration la plus élevée est de 6,9 mg/kg), la bifenthrine (insecticide pyréthroïde), le DDE (dérivé du DDT), le nonachlore (insecticide organochloré). Les insecticides pyréthroïdes étaient les molécules les plus recherchées et, par conséquent, les plus fréquemment trouvées.
- 74% des échantillons d'eau de surface (3.022) et de sédiments (2.239) ont montré la présence de plus de deux substances actives, avec une moyenne de 4,5 molécules par échantillon et un maximum de 17 substances par échantillon : plus de 20% des échantillons ont montré 10 molécules ou plus en même temps. 84% des sites urbains étudiés dans plusieurs États américains présentent au moins deux substances actives (dans les eaux de surface et les sédiments). Les sédiments se sont révélés plus contaminés : des mélanges de pesticides ont été détectés dans 82% des échantillons et 85% des sites (le nombre moyen de substances actives par échantillon est de 4,7). Les molécules hydrophobes se concentrent plus facilement dans les sédiments.
- Les concentrations de certaines molécules sont 32.000 fois supérieures à celles qui sont certainement dangereuses pour les organismes aquatiques (par exemple, dans le cas de l'insecticide dichlorvos).

Un autre suivi de 354 échantillons d'eau de surface prélevés sur 97 sites dans 12 États enregistre le plus souvent la bifenthrine et l'imidaclopride (insecticide néonicotinoïde).

Ces données, bien qu'ayant de nombreuses limites (certaines catégories, comme les fongicides et l'herbicide glyphosate, sont moins fréquemment recherchées) confirment l'exposition chronique des organismes aquatiques à des molécules très dangereuses comme les insecticides, même dans des contextes non agricoles. L'étude confirme que les eaux de surface agricoles sont plus contaminées par les insecticides que les eaux urbaines. Les effets écotoxicologiques sont en grande partie inconnus mais certainement négatifs : la réduction de la biodiversité enregistrée dans les systèmes fluviaux, les marais et les lacs est parmi les plus évidentes et les plus désastreuses de toute la planète.

Les pesticides sont présents dans 70% des eaux de surface aux États-Unis à des concentrations supérieures aux seuils de sécurité réglementaires. Parmi les molécules les plus fréquemment retrouvées, on trouve l'insecticide fipronil, qui est également toxique pour les oiseaux et les poissons, et ses dérivés (sulfure, sulfone, désulfinyl et fipronil amide, qui sont plus persistants que le fipronil). Aux États-Unis, le fipronil est utilisé contre les fourmis, les termites et dans de nombreuses cultures telles que le maïs (dans ce cas, il est également distribué dans les semences) et les pommes de terre. En raison de son utilisation intensive en agriculture,

le fipronil peut être trouvé dans les eaux de surface à des concentrations dangereuses (jusqu'à 6,4 µg/L) : dans 22% des eaux de surface prélevées sur 444 sites dans 5 régions différentes.¹²⁶⁴ La sensibilité des différents invertébrés aquatiques au fipronil et à ses dérivés peut varier de plus d'un ordre de grandeur et, en général, la complexité de l'écosystème aquatique diminue à mesure que la concentration de fipronil et de ses dérivés augmente (comme on peut s'y attendre). La capacité de croissance et de développement de certains invertébrés (par exemple Chironomidae) est réduite de 50% par de très faibles concentrations : 0,03 µg/L de sulfure, 0,06 µg/L de sulfone, 0,78 µg/L de fipronil, 0,97 µg/L d'amide (ces concentrations sont plus de 20 fois inférieures à celles qui peuvent être enregistrées dans les eaux de surface).¹²⁶⁴ Le dérivé amide du fipronil était moins toxique et les dérivés sulfure et sulfone sont 26 fois et 13 fois plus toxiques que la molécule de départ (fipronil). Ces informations confirment que des concentrations infinitésimales de fipronil et de ses dérivés sont suffisantes pour modifier l'équilibre des écosystèmes aquatiques. Les invertébrés aquatiques (y compris les insectes) peuvent être beaucoup plus sensibles au fipronil et à d'autres pesticides que les organismes utilisés pour effectuer des évaluations écotoxicologiques en laboratoire (*Daphnia magna* et *Hyalella azteca*). En outre, les effets sur l'ensemble de l'écosystème ne peuvent pas être évalués à l'avance en laboratoire : par exemple, une réduction de l'abondance des insectes aquatiques herbivores entraîne une augmentation des algues, avec pour conséquence des modifications importantes de la chaîne trophique et des flux de carbone et d'azote. Les concentrations de fipronil et de ses dérivés enregistrées dans les eaux de surface sont supérieures à celles qui ont certainement des effets dévastateurs sur l'équilibre délicat de ces écosystèmes.

Des concentrations dangereuses de pesticides tels que les néonicotinoïdes se retrouvent dans les eaux de nombreux endroits dans le monde. Ces molécules sont présentes dans plus de 50% des rivières surveillées aux États-Unis.⁴⁸³ En Californie, 89% des 75 échantillons d'eau de surface contiennent également de l'imidaclopride, et un cinquième des échantillons dépasse les concentrations considérées comme dangereuses (1,05 µg/L pour une exposition chronique).^{434, 435} En Australie, 93% des échantillons d'eau de rivière testés contiennent deux ou trois néonicotinoïdes à des concentrations comprises entre 0,06 et 4,5 µg/L.⁴³⁹ En Australie (dans des rivières de la zone urbaine de Sydney), 93% des échantillons contenaient au moins deux ingrédients actifs à une concentration moyenne de 118 ng/L. Au Canada (Ontario), la clothianidine et le thiaméthoxame sont présents dans 100% et 99% des échantillons d'eau prélevés près des champs de maïs, à des concentrations moyennes de 2,3 µg/L et 1,1 µg/L respectivement.¹²⁷² Un suivi mené aux USA, entre 2012 et 2014, confirme la présence de néonicotinoïdes dans 53% des 149 échantillons d'eau prélevés sur 38 sites : l'imidaclopride était la molécule la plus fréquemment mesurée.¹²⁷² La présence de néonicotinoïdes dans les eaux de surface est également confirmée par d'autres études en Suisse (jusqu'à 65 ng/L), au Canada (jusqu'à 2.800 ng/L) et en Californie (jusqu'à 50 ng/L).¹²⁷²

Dans le sud de la Chine, dans la région de Guangdong, la rivière (Pearl River) qui traverse la ville de Guangzhou (plus de 14 millions d'habitants) enregistre des concentrations élevées de néonicotinoïdes. L'imidaclopride, le thiaméthoxame, la clothianidine, le thiaclopride et l'acétamipride ont été échantillonnés sur 14 sites : tous les échantillons d'eau de surface ont enregistré la présence d'imidaclopride, de thiaméthoxame, de clothianidine, d'acétamipride et de 93% de thiaclopride ; la concentration totale des cinq ingrédients actifs variait de 92 à 321 ng/L (concentration moyenne de 192 ng/L).¹²⁷² L'imidaclopride se retrouve à des concentrations allant jusqu'à 154 ng/L. Les 9 sites où les sédiments sont échantillonnés enregistrent également une contamination dangereuse des 5 néonicotinoïdes recherchés : entre 0,4 et 2,6 ng/g de matière sèche. Tous les échantillons de sédiments enregistrent des néonicotinoïdes (l'acétamipride et le thiaméthoxame sont trouvés dans tous les échantillons). Les concentrations d'insecticides néonicotinoïdes enregistrées dans les eaux de surface et les sédiments du monde entier sont supérieures à celles qui sont certaines de générer des effets

aigus et chroniques dans ces écosystèmes délicats (par exemple, dans les sédiments, ils endommagent les micro-organismes). En conséquence, on peut s'attendre à ce que la biodiversité soit gravement compromise.

En Roumanie, la contamination par les néonicotinoïdes a été étudiée dans le Danube et certains de ses affluents (ces insecticides sont très solubles).⁴³⁸ Sur 16 sites, 48 échantillons d'eau ont été prélevés. Les résultats obtenus montrent une forte corrélation entre la présence de ces insecticides et les pratiques agricoles (par exemple, le semis de graines enrobées d'insecticides). Dans les échantillons d'eau de surface, les taux de détection et les concentrations étaient les suivants : thiaméthoxame 68,7% (0,9-3,8 ng/L) ; clothianidine 64,6% (0,84-9,6 ng/L) ; nitenpyram 52,08% (0,39-11,1 ng/L) ; imidaclopride 31,2% (0,5-8,2 ng/L) ; acétamipride 16,6% (0,84-12,7 ng/L).⁴³⁸ La concentration totale maximale de néonicotinoïdes était de 31,6 ng/L, ce qui est certainement capable de causer des dommages irréversibles à la faune aquatique. La concentration la plus élevée a été enregistrée pour l'acétamipride : 12,7 ng/L.

Aux Pays-Bas et dans certains pays d'Europe, des concentrations sûres de néonicotinoïdes dans les eaux de surface de 0,2 µg/L pour une exposition à court terme et de 8,3 ng/L pour une exposition chronique ont été établies.⁴³⁸ Au Canada, la concentration de sécurité établie pour les eaux de surface (pour de courtes périodes) est de 0,23 µg/L, tandis qu'en Suède, elle est de 13 ng/L. Aux États-Unis, la concentration à laquelle les effets chroniques ne peuvent être facilement mesurés a été fixée à 0,01 µg/L.

L'eau contaminée distribue les substances actives toxiques dans le sol où elles peuvent rester longtemps. La demi-vie dans le sol est d'environ 1.386 jours pour la clothianidine, 228 jours pour l'imidacloprid, 100 jours pour le dinotefuran et 72 jours pour le thiamethoxam.⁴³⁸ Cette étude rappelle que l'imidaclopride représente 41% du marché des néonicotinoïdes et est le deuxième pesticide le plus utilisé dans le monde. En 2018, la Commission européenne a interdit l'utilisation de l'imidaclopride, du thiaméthoxame et de la clothianidine dans les champs (ils sont autorisés dans les serres), mais d'autres molécules similaires n'ont pas été interdites ; cependant, elles restent malheureusement autorisées dans de nombreux autres pays du Monde.

Aux Pays-Bas, l'imidaclopride est enregistré dans les échantillons d'eau de surface : sur 2% des sites contrôlés, il dépassait 320 µg/l.⁴¹² Des concentrations d'imidaclopride de 240 µg/L ont été enregistrées dans l'eau des rizières (immédiatement après la distribution sur le terrain).⁴¹² Cette concentration a chuté à 5 µg/L après une semaine. Les eaux de surface à proximité des champs de colza ont enregistré des concentrations de clothianidine allant jusqu'à 3,1 µg/L.⁴¹² Ces concentrations ne sont que 2 à 7 fois inférieures aux doses capables de tuer 50% des amphibiens ou des poissons exposés en quelques heures. Par rapport aux néonicotinoïdes, les concentrations de fipronil dans les eaux de surface sont plus proches des doses capables de tuer 50% des poissons. Une autre étude, également réalisée aux Pays-Bas, a montré une corrélation entre la réduction de l'abondance de plusieurs organismes aquatiques (amphipodes, basommatophores, diptères, éphéméroptères et isopodes) et une augmentation de la concentration d'imidaclopride (entre 13 et 67 ng/L).⁴³⁴ Les effets sublétaux enregistrés chez les invertébrés aquatiques à cause des néonicotinoïdes (par exemple le thiaclopride) comprennent : des dommages au développement des larves, des changements dans la mue, une longévité réduite des adultes, une fécondité altérée, un rapport sexuel modifié, une mobilité, une orientation, un comportement alimentaire et le ponte des œufs altérés.

Aux Pays-Bas, l'imidaclopride s'est avéré être l'un des trois pesticides les plus importants en tant que contaminant environnemental.⁴³⁴ La concentration maximale trouvée dans les eaux néerlandaises (320 µg/L) est 25.000 fois supérieure à la limite maximale tolérable et 56 fois supérieure à la dose qui tue 50% des larves d'organismes aquatiques (il s'agit de chironomes, une grande famille cosmopolite d'insectes de l'ordre des diptères qui ressemblent à des moustiques). Ces résultats montrent que les néonicotinoïdes peuvent facilement contaminer l'eau et générer des effets létaux.

78 pesticides différents sont trouvés dans les eaux suédoises : 33 herbicides, 13 insecticides et 7 dérivés de dégradation.⁴³⁶ Parmi les molécules dépassant les concentrations considérées comme dangereuses, on trouve : bentazone, boscalid, azoxystrobine (à une concentration maximale de 3,9 µg/L, soit 4 fois la concentration considérée comme dangereuse ; la valeur guide à ne pas dépasser dans l'eau est de 0,9 µg/L), BAM, propamocarbe, mecoprop, metalaxyl, imidacloprid (à une concentration maximale de 15 µg/L, soit plus de 1.100 fois la valeur sûre à ne pas dépasser dans l'eau de 0,013 µg/L), le métamitron (à une concentration maximale de 4,4 µg/L) et le MCPA. Les fongicides boscalid et propamocarb sont présents dans les six zones d'étude. L'imidaclopride est l'ingrédient actif pour lequel le nombre d'échantillons dépassant les valeurs maximales autorisées par les directives est le plus élevé : 23 échantillons, suivi par l'endosulfan et son métabolite (11 échantillons).⁴³⁶

En France, 92% des 2.950 points de surveillance de la qualité de l'eau contiennent au moins un pesticide et 60% des échantillons contiennent plus de 10 molécules différentes.⁴³⁷ Au total, 400 molécules différentes sont trouvées sur les 670 recherchées. Dans 20,2% des points d'échantillonnage, plus de 25 molécules ont été trouvées en même temps et dans 37,2% entre 10 et 25. 8,3% seulement des échantillons ne contenaient aucune des substances recherchées. Les catégories les plus fréquemment rencontrées sont, par ordre décroissant, les herbicides (glyphosate, atrazine et leurs métabolites ; il convient de souligner une fois encore que l'utilisation de l'atrazine est interdite depuis des années), les insecticides (imidaclopride) et les fongicides (boscalid). Le seuil de sécurité en matière d'écotoxicité est certainement dangereusement dépassé par le bentazone, le glyphosate, le boscalid et l'imazalil.⁴³⁷

Au Canada (Québec), 99% des 68 échantillons d'eau du fleuve Saint-Laurent analysés en 2017 contiennent au moins un des pesticides recherchés : 2 herbicides (le glyphosate est retrouvé dans 84% des échantillons, jusqu'à 3.000 ng/L ; l'atrazine est trouvée dans 82% des échantillons), 8 insecticides systémiques (acétamipride, clothianidine trouvée dans 46% des échantillons, dinotefuran, fipronil, imidacloprid, nitenpyram, thiacloprid et thiamethoxam trouvés dans 59% des échantillons) et quelques métabolites (par exemple : desethylatrazine trouvée dans 47% des échantillons).⁴⁴⁰ L'atrazine et un de ses métabolites sont trouvés jusqu'à une concentration de 860 ng/L et la somme des 6 néonicotinoïdes est détectée jusqu'à des concentrations de 115 ng/L.⁴⁴⁰ Parmi les échantillons, 31% présentaient des concentrations supérieures au seuil de sécurité australien pour les néonicotinoïdes dans les rivières, qui est de 8,3 ng/L.

L'herbicide glyphosate est l'une des substances actives les plus utilisées dans le monde et agit en inhibant la synthèse des acides aminés aromatiques dans les plantes et de nombreux micro-organismes. Grâce notamment à la diffusion de plantes génétiquement modifiées résistantes à sa phytotoxicité, les quantités distribuées ont été multipliées par 12 entre 1995 et 2014 (826 millions de kilogrammes en 2014).¹²⁶⁹ L'ingrédient actif est mélangé à d'autres substances qui sont secrètes car les fabricants sont autorisés à ne pas les divulguer. Par conséquent, les effets négatifs sur les espèces non ciblées générés par différentes marques peuvent être très différents. En raison de son utilisation intensive, le glyphosate peut être détecté à des concentrations dangereuses dans les eaux de surface (10 mg/L) et les mers (jusqu'à 1,7 µg/L dans l'océan Pacifique ; jusqu'à 1,4 mg/L dans la mer Baltique).¹²⁶⁹ Les concentrations qui sont certaines de tuer ou de nuire à certaines espèces de crustacés marins sont inférieures à celles enregistrées dans les océans. Malheureusement, ces concentrations risquent d'augmenter si l'on continue à utiliser le glyphosate et les effets toxiques peuvent être renforcés par le réchauffement climatique (il existe une synergie entre la toxicité et la température de l'eau).¹²⁶⁹

Pour l'eau potable en Europe, une limite de sécurité d'une concentration maximale de 0,1 µg/L pour un seul pesticide et de 0,5 µg/L pour la concentration maximale de tous les pesticides (pesticides totaux ; décret législatif 31/2001) a été réglementée.²¹¹ En raison de l'énorme quantité de pesticides utilisés, ces concentrations sûres sont dépassées en Europe (et au-delà). En

2013, il a été constaté qu'environ 7% des eaux potables souterraines présentaient des concentrations d'au moins un des 31 pesticides recherchés, avec des concentrations supérieures à la concentration maximale admissible.²⁷⁶ Même 5% des eaux de surface (rivières) utilisées pour l'approvisionnement en eau potable sont contaminées par des pesticides à des concentrations supérieures aux limites maximales autorisées.²¹¹ Ce chiffre est probablement optimiste car seules 31 molécules sont recherchées sur les quelques centaines utilisées ; de plus, l'eau est également contaminée par d'autres substances (ex : l'inventaire des produits chimiques commercialisés en Europe en classe 106.211).²¹⁵

La surveillance des résidus de pesticides dans les eaux de surface et souterraines en Italie confirme une situation alarmante :¹⁶⁴

- En 2016, des pesticides ont été retrouvés dans 67% des points d'échantillonnage des eaux de surface et 33,5% des points d'échantillonnage des eaux souterraines (moyenne nationale). La présence de mélanges, avec un nombre moyen d'environ 5 pesticides et un maximum de 55 molécules, dans des échantillons uniques est inquiétante. On trouve au total 205 molécules différentes dans les eaux de surface et 171 dans les eaux profondes.⁵⁰⁴ Les herbicides sont les molécules les plus fréquemment retrouvées (55,7%). Parmi les substances trouvées à des concentrations supérieures à la limite fixée pour l'eau potable (0,1 µg/L ; décret législatif 31/2001) figurent certains fongicides (diméthomorphe, tébuconazole, iprovalicarb, métalaxyl, flucopicolide) principalement utilisés en viticulture, certains herbicides (métolachlore et terbuthylazine) et l'insecticide néonicotinoïde imidacloprid. Des molécules interdites comme l'atrazine et ses métabolites se retrouvent dans les eaux de surface. Cet herbicide est interdit depuis 2004 mais on le retrouve dans 66,7% des échantillons d'eau de surface et 33,8% des échantillons d'eau souterraine. L'aldicarbe, qui est interdit depuis 2003, est également présent dans 20,7% des points de surveillance des eaux de surface et 8,8% des points de surveillance des eaux souterraines.⁵⁰⁴ La substance active hexaflumuron (régulateur de croissance des insectes : inhibe la formation de l'hydrate de carbone chitine, qui forme l'exosquelette des insectes), interdite en Italie depuis 2004, est présente dans un cinquième des eaux souterraines contrôlées ; le carbaryl (insecticide carbamate), interdit depuis 2009, est présent dans 11% des échantillons d'eau de surface. Le glyphosate est présent dans 40% des eaux de surface ; l'imidaclopride est présent dans plus de 50% des échantillons d'eau de surface et dans 10% des échantillons d'eau souterraine. En conséquence, des rivières comme l'Arno et le Pô sont fortement contaminées par des dizaines de pesticides différents.

- Dans certaines régions italiennes, la présence de pesticides est beaucoup plus répandue que la moyenne nationale, touchant plus de 90% des points d'échantillonnage des eaux de surface dans le Frioul-Vénétie Julienne, la province de Bolzano, le Piémont et la Vénétie, et plus de 80% des points d'échantillonnage en Émilie-Romagne et en Toscane. La présence de pesticides est enregistrée dans plus de 70% des échantillons d'eau de surface en Lombardie et dans la province de Trente. Dans les eaux souterraines, la présence de pesticides est particulièrement élevée dans le Frioul, avec 81% des échantillons positifs, dans le Piémont avec 66% et en Sicile avec 60% des échantillons positifs. En Émilie-Romagne, l'imidaclopride a été trouvé dans 40% des échantillons et le thiaméthoxame a atteint une concentration de 9,8 µg/L (ce sont des insecticides néonicotinoïdes).⁵⁰⁴ Globalement, la contamination est plus répandue dans la vallée du Pô.

- Les herbicides et certains de leurs métabolites sont les substances les plus fréquemment retrouvées, notamment dans les eaux de surface. On trouve également des insecticides capables de nuire gravement aux pollinisateurs, comme les néonicotinoïdes.

- Malheureusement, des substances interdites (et leurs métabolites) telles que l'atrazine, le métolachlore, l'oxadixyl et le DDT sont détectées depuis des années.

En 2016, en Émilie-Romagne, l'herbicide glyphosate a été recherché dans 20 échantillons d'eau et seuls 3 ont atteint le seuil de sécurité de 0,1 µg/L : la concentration maximale s'est avérée être de 6,1 µg/L.⁵⁰⁰ Dans certaines zones, comme à Ferrare, 65% des échantillons d'eau potable analysés en 2018 présentaient des résidus (89 substances ont été recherchées).⁴⁹⁹

Ces informations dressent un tableau alarmant, car les pesticides sont largement présents dans l'eau, même s'ils sont interdits depuis des années. Une augmentation des concentrations d'atrazine, de simazine, d'alachlore et de métolachlore dans les eaux souterraines a été associée à une augmentation probable de 3% du risque d'enregistrement de la maladie de Parkinson, pour chaque augmentation de 1 µg/L.⁴⁹¹ La présence de méthomyl, de chlorpyrifos et de propargite dans l'eau potable était également associée à une probabilité accrue d'enregistrer la maladie de Parkinson.⁴⁹¹

La pollution par les pesticides des écosystèmes aquatiques tels que les lacs et les rivières constitue une menace mondiale majeure.⁴¹⁵ Des effets nocifs sur les écosystèmes d'eau douce sont enregistrés à des concentrations inférieures à celles considérées comme sûres, c'est-à-dire celles mesurées par des tests de toxicité aiguë sur l'organisme aquatique *Daphnia magna*, un petit crustacé planctonique originaire d'Amérique du Nord et largement répandu en Eurasie et dans certaines parties de l'Afrique.⁴¹³ C'est un organisme qui a été largement utilisé en laboratoire pour des études d'écotoxicologie depuis 1934. Un autre crustacé, *Gammarus pulex*, qui vit en eau douce (il est important pour la dégradation des déchets) est également endommagé par les concentrations de pesticides couramment présents dans l'eau (par exemple l'imidaclopride entre 0,8 et 30 µg/L), tout comme d'autres crustacés.^{415, 416}

La situation enregistrée par la surveillance environnementale des eaux est dramatique malgré de nombreuses limites, notamment :

- Seules quelques substances sont recherchées car il n'est pas économiquement viable de rechercher systématiquement toutes les molécules.
- Les différentes régions effectuent des contrôles différents. Par exemple, en Émilie-Romagne, 89 substances sont recherchées, dans les Marches 22 et dans le Piémont 28. Il y a donc de nombreuses différences territoriales. En 2014, en Émilie-Romagne, le glyphosate n'a pas été recherché, tandis qu'en Lombardie, il a été à l'origine de nombreuses non-conformités. En 2017, en Toscane, des pesticides ont été trouvés dans 95% des échantillons d'eau de surface et des concentrations élevées ont été enregistrées dans 10% d'entre eux. En Toscane, le glyphosate est présent dans 60% des échantillons analysés et à des concentrations supérieures à 1 µg/L. Il est important de remarquer que le glyphosate, après les produits inorganiques tels que les produits à base de cuivre et de soufre, est le pesticide le plus vendu en Italie et en Toscane.
- Les sommes des quantités de pesticides dans chaque échantillon ne sont pas évaluées. À titre d'exemple, en Émilie-Romagne, la somme moyenne des pesticides parmi ceux recherchés dans les eaux de surface dépassait 2,4 µg/L.
- Les métabolites et les dérivés des pesticides ne font pas l'objet de recherches, en partie parce qu'ils sont largement inconnus. Tant les principes actifs que les autres molécules avec lesquelles ils sont mélangés dans les produits commerciaux sont transformés dans l'environnement et dans les organismes en d'autres molécules qui peuvent être tout aussi ou plus dangereuses. Les dérivés de la substance active de départ peuvent exercer leur toxicité de différentes manières et sur différentes cibles. Au moins 50 produits de dégradation issus de 15 familles de pesticides sont connus pour contaminer l'eau.⁵³³ Certains métabolites résultent de l'action des micro-organismes dans le sol, d'autres sont générés au sein des organismes, tant végétaux qu'animaux. D'autres sont générés par des réactions qui ont lieu en dehors des êtres vivants (action de l'eau, de l'oxygène ou de la lumière). En Italie, certains métabolites, comme ceux du glyphosate, qui est l'un des

principes actifs les plus vendus de la planète, se retrouvent dans les eaux souterraines. Aux États-Unis, le fipronil a été trouvé dans 78% des échantillons d'eau contrôlés, tandis que ses métabolites ont été trouvés plus fréquemment : le fipronil sulfone dans 81,7% des échantillons et le fipronil sulfide dans 90%.³⁵⁹ Le fipronil et ses métabolites dans l'eau contribuent à réduire l'abondance et la diversité de la communauté des invertébrés aquatiques et nuisent aux poissons.³⁵⁹ Le fipronil et ses métabolites peuvent s'accumuler dans les poissons. Des néonicotinoïdes tels que le thiaméthoxame, à des concentrations allant jusqu'à 9 µg/L, l'imidaclopride ou la clothianidine jusqu'à 3,34 µg/L sont trouvés dans les eaux souterraines aux États-Unis.³⁵⁹ Certains métabolites de pesticides peuvent être retrouvés dans l'eau des décennies après la dernière utilisation autorisée, comme ceux du célèbre insecticide organochloré DDT (les métabolites sont le DDD et le DDE).
178, 181, 183

Malgré les limites de la surveillance de la concentration des pesticides dans l'eau, les informations dont nous disposons sont suffisantes pour justifier une interdiction de l'utilisation de ces poisons. Les enquêtes sur la présence de pesticides dans l'eau, comme les néonicotinoïdes, montrent qu'ils passent facilement du sol à l'eau et vice versa, que la pollution est généralisée et que les concentrations enregistrées sont capables de nuire aux organismes aquatiques. Il convient de remarquer que les seuils de sécurité fixés dans les différents pays sont très différents, car ils sont le résultat de considérations politiques et économiques plutôt que sanitaires et écologiques. Bien que les seuils de sécurité soient fixés selon des critères subjectifs, dictés par des évaluations économiques ou par la commodité, ils sont régulièrement dépassés. Les principes actifs recherchés dans les contrôles officiels sont également très différents, même à l'intérieur des frontières nationales, comme c'est le cas en Italie.

Si l'on continue à ignorer ce problème, il n'est pas exagéré de prédire que, dans certaines régions, l'eau sera tellement contaminée par les pesticides qu'elle pourra être utilisée pour combattre les ennemis des plantes sans autre apport de substances actives : par exemple, aux Pays-Bas pour lutter contre les pucerons et en Italie contre les mauvaises herbes.¹⁶⁶ Il se pourrait également qu'en raison de l'omniprésence des pesticides, de nombreux organismes deviennent résistants, comme cela s'est produit avec les mauvaises herbes et les insectes pathogènes. Dans de nombreuses régions de la planète et en Italie, il devrait être difficile d'espérer une certification de la production selon les méthodes de l'agriculture biologique, car les pesticides sont contenus dans l'eau d'irrigation (et dans les sols) et il est impossible de réduire leurs concentrations.

La contamination de l'eau par les pesticides nuit également aux insectes qui sont liés à l'eau non salée, car ils effectuent une partie de leur cycle de vie, généralement leur cycle de vie juvénile, dans les cours d'eau : par exemple les trichoptères, les plécoptères et les éphéméroptères¹. Certains insectes aquatiques sont plus sensibles aux insecticides que les

¹ Les éphéméroptères (Ephemeroptera) sont un ordre d'insectes hémimétaboles terrestres qui, à leur stade larvaire, vivent dans les cours d'eau douce de surface.⁶⁸⁷ Les adultes volent mal à cause de leurs très petites ailes postérieures (parfois elles peuvent même manquer). Les ailes sont souvent transparentes, richement nervurées et ne sont présentes que chez l'adulte : au repos, elles sont toujours tenues droites. Une autre caractéristique est la présence de deux queues à l'extrémité du corps, parfois accompagnées d'un troisième filament médian. À partir du stade adulte, les éphéméroptères cessent de se nourrir en raison de l'atrophie des pièces buccales. Ce n'est pas un hasard si, en grec, *ephemeros* signifie "vivre un jour". Une fois qu'ils ont atteint le stade de l'aile, leur durée de vie est courte : la plupart des espèces vivent moins d'un jour, et quelques-unes seulement atteignent une semaine. Ayant si peu de temps à leur disposition, ils cherchent immédiatement un compagnon. L'accouplement a lieu en vol, toujours près de l'eau. Le mâle attrape littéralement la femelle. Les mâles ont généralement des yeux plus grands pour aider à localiser les femelles, qui volent en grands essaims près de l'eau au moment de l'accouplement. La femelle pond ses œufs, les laissant tomber à la surface de l'eau quelques heures après l'accouplement. Dans certains genres, les femelles se couchent plutôt sur des rochers, des tiges ou des feuilles, ou même, comme dans le cas du genre *Baetis*, nagent sous l'eau pour trouver un abri sûr. La plupart des femelles d'éphéméroptères pondent entre

abeilles (*Apis mellifera*). En particulier, cinq des six espèces testées (trois de trichoptères, deux de plécoptères et une d'éféméroptères) sont plus sensibles à l'insecticide néonicotinoïde imidaclopride que les abeilles domestiques, et les six espèces d'insectes aquatiques sont plus sensibles à l'insecticide pyréthroïde lambda-cyhalothrine.^{620, 687} Chez ces espèces d'insectes aquatiques, les différentes doses capables de tuer 50% des animaux exposés (DL₅₀) varient, montrant des différences non négligeables. Dans le détail, les DL₅₀ pour l'imidaclopride varient entre 0,12 et 15,4 µg/g et pour la lambda-cyhalothrine entre 0,01 et 0,51 µg/g. Les six espèces testées sont plus sensibles à la lambda-cyhalothrine qu'à l'imidaclopride et les six espèces sont plus sensibles aux deux insecticides que les abeilles domestiques (entre 0,8 et 81 fois).⁶²⁰ Les stades larvaires des insectes du groupe des éphémères (genres *Baetis* et *Epeorus*) sont endommagés par les concentrations d'imidaclopride inférieures à 0,1 µg/L.⁶⁹⁷ Cette étude met en évidence le fait que les effets négatifs des pesticides sur les insectes qui passent au moins une partie de leur vie dans des eaux non salées sont sous-estimés et ne peuvent être extrapolés à partir des résultats obtenus en laboratoire avec des abeilles domestiques. De très faibles concentrations d'imidaclopride (0,5 µg/L) sont également connues pour nuire aux vers de terre aquatiques, comme *Lumbriculus variegatus*, et aux vers de terre terrestres, comme le ver de terre (une concentration d'imidaclopride dans le sol de 2 mg/kg est toxique pour *Eisenia fetida*).⁶⁹⁷

Les eaux de surface contaminées par des pesticides, utilisées pour l'irrigation, sont à l'origine de la découverte de certaines substances dangereuses dans le miel : une ruche a également besoin de plus de 100 litres d'eau par an, dont une partie est prélevée sur les plantes (les gouttes de guttation).¹⁷⁸

L'exposition aux pesticides dans l'eau et les dommages qui en résultent sont également sous-estimés pour d'autres insectes tels que les pollinisateurs sauvages. Il faut espérer que nous n'atteindrons pas des conditions qui nous semblent apocalyptiques aujourd'hui, mais qui commencent à se produire quelque part dans le monde : des humains pollinisant les vergers de pommiers en Chine ; il faut être naïf et ignorant pour croire que cela pourrait être une issue.²⁰⁰

Les abeilles domestiques ne stockent pas d'eau dans la colonie, elles ont donc besoin de s'approvisionner en permanence, surtout pendant les mois les plus chauds, car elles l'utilisent également pour réguler la température de toute la colonie. Les abeilles ouvrières peuvent transporter 44 mg d'eau en un seul voyage.¹²³² Certains pesticides, comme les néonicotinoïdes, sont très solubles dans l'eau et se retrouvent donc facilement dans l'eau. Ces substances peuvent être toxiques à de très faibles concentrations : 4 milliardièmes de gramme de clothianidine, 3,4 d'imidaclopride ou 5 de thiaméthoxame suffisent à tuer les abeilles exposées par ingestion. La contamination de l'eau est tellement étendue et généralisée qu'il est conseillé aux apiculteurs de fournir aux colonies de l'eau propre à proximité de la ruche.¹²³² L'objectif est de réduire la mortalité des abeilles en diminuant l'exposition par l'eau contaminée. Un autre effet positif potentiel est que les abeilles devront consommer moins d'énergie pour obtenir de l'eau, car elles n'auront pas à parcourir de longues distances pour l'amener à la ruche. Cela ne peut pas être une solution.

L'effet sur la réduction éventuelle de la mortalité suite à l'apport d'eau propre a été testé chez des abeilles élevées à proximité de cultures de myrtilles, de soja et de maïs au Canada (Québec ; 2014 et 2015).¹²³² Parmi les résultats intéressants, on constate que les abeilles préfèrent l'eau salée (0,5% de sodium ; 8 L par semaine) ou l'eau contaminée par l'élevage de poulets, à l'eau sans ajouts. Dans cette étude, la fourniture d'eau propre aux colonies d'abeilles n'a curieusement

500 et 3.000 œufs, tandis que certaines espèces, comme celles du genre *Palingenia*, peuvent en pondre jusqu'à 12.000. Ils peuvent éclore presque immédiatement ou, dans des cas extrêmes, vers 11 mois. La courte durée de vie des adultes est compensée par un long processus de développement larvaire. Certaines larves mettent jusqu'à deux ans pour atteindre leur première mue (*Ephemera danica*), bien que la moyenne soit toujours d'un an. Les larves de certaines espèces effectuent jusqu'à 27 mues. Leur développement se fait entièrement dans ou près de l'eau. Elles se nourrissent de plantes et d'algues et respirent grâce à des branchies latérales.

pas permis d'enregistrer une réduction de la mortalité, alors que l'eau de surface était contaminée par au moins 17 composés chimiques, 2 insecticides (dont au moins un néonicotinoïde), 2 fongicides et des herbicides (jusqu'à 19 ppb de clothianidine et jusqu'à 5 ppb de thiaméthoxam). Les échantillons d'eau de l'environnement ont enregistré au moins un herbicide et un néonicotinoïde. L'eau fournie dans la colonie ne contenait pas les pesticides testés, mais aucun effet positif n'a été détecté. ¹²³²

Si les abeilles absorbent 44 mg d'eau lors d'un voyage et que les concentrations de néonicotinoïdes atteignent jusqu'à 19 ppb de clothianidine et jusqu'à 5 ppb de thiaméthoxame, cela signifie qu'elles sont exposées à 0,84 ng de clothianidine et 0,22 ng de thiaméthoxame à chaque vol de ravitaillement. ¹²³² À 35°C, les abeilles boivent environ 11 millièmes de litre (µL) d'eau par jour, de sorte qu'en quelques jours, l'exposition pourrait atteindre des concentrations juste inférieures à celles capables d'enregistrer des effets létaux. Cependant, des effets sublétaux se produiront à ces niveaux d'exposition.

On en est arrivé au point où il faut conseiller aux apiculteurs d'approvisionner leurs colonies avec de l'eau autre que celle de l'environnement : une vision différente est nécessaire, une agriculture sans pesticides doit être conçue.

Une expérience est en cours qui affecte également de manière destructive les écosystèmes d'eau douce précaires. Les effets des résidus de milliers de molécules chimiques que nous distribuons volontairement, comme les pesticides, sont largement inconnus : par exemple, les herbicides réduisent la quantité d'algues (phytoplancton), augmentent l'acidité de l'eau et le passage de la lumière (il s'agit d'un effet indirect dû à la mort des organismes photosynthétiques) ; l'exposition des poissons à des sédiments contaminés (par des hydrocarbures aromatiques polycycliques, des biphényles polychlorés, de l'hexachlorobenzène et d'autres substances) favorise l'apparition de tumeurs, de malformations, d'une baisse de la fertilité et d'une altération de la fonction immunitaire. ^{1267, 1268, 1270} Lorsque des informations complètes et concluantes seront disponibles sur l'écotoxicité d'innombrables combinaisons de substances qui n'existent pas dans la nature, il sera trop tard : elles ne seront plus nécessaires car les écosystèmes aquatiques seront devenus des déserts biologiquement inhospitaliers. Les effets sur la biodiversité, sur les chaînes alimentaires dans des écosystèmes très fragiles comme les étangs, les marais, les lacs, les rivières, les estuaires sont certainement négatifs, mais nous n'en connaissons pas les détails. ^{1267, 1268, 1270} Les analyses chimiques effectuées pour évaluer la quantité d'un petit nombre de substances ne sont pas en mesure de prédire les effets écotoxicologiques ni même de les expliquer (dans certains cas, les limites de détection des méthodes analytiques sont supérieures aux concentrations qui sont certainement capables de générer des effets négatifs sur les organismes aquatiques). L'approche analytique n'est pas en mesure de permettre une analyse adéquate des risques. ¹²⁷⁰ En outre, la contamination chimique interagit avec de nombreux autres facteurs perturbateurs tels que le changement climatique, l'altération des cycles de l'azote et du phosphore, le béton, la déforestation, les eaux usées civiles, les émissions industrielles et animales, la pêche, l'aquaculture et l'introduction d'espèces exotiques. Pour mettre en évidence certaines interactions possibles largement inconnues, il est souligné qu'il a été découvert récemment que l'augmentation de la température des océans accroît la toxicité de principes actifs tels que le glyphosate (chez certains crustacés marins). ¹²⁶⁹ Nous perpétons une véritable agression, fulgurante pour les organismes aquatiques et autodestructrice.

QUELQUES DÉRIVÉS ET MÉTABOLITES DE PESTICIDES QUI PEUVENT CONTAMINER L'EAU (et pas seulement)

Dans ce qui suit, des informations sont fournies sur certains dérivés de différents ingrédients actifs de pesticides, qui peuvent être trouvés dans l'eau à des concentrations dangereuses : même de l'ordre de quelques dizaines de microgrammes par litre. ⁵³³ Il est important de remarquer que :

- certains métabolites peuvent provenir de différents principes actifs ;
- certaines matières actives sont transformées en d'autres matières actives : par exemple, le fongicide bénomyl est transformé en carbendazim ;
- les métabolites peuvent être beaucoup plus persistants dans l'environnement que les molécules de départ et peuvent être trouvés dans le sol des années après l'application des ingrédients actifs. Ils ont donc le potentiel de s'accumuler dans les organismes aquatiques (par exemple le 1-naphtol du carbaryl) ou dans les aliments (par exemple le sulfate d'endosulfan dans le lait de vache) ;
- certains composés dérivés sont beaucoup plus toxiques que les principes actifs dont ils sont dérivés : chez les animaux, le chlorpyrifos-oxon est environ 3.000 fois plus toxique pour le système nerveux que son composé parent (l'insecticide chlorpyrifos).

Le tableau suivant donne quelques informations sur la toxicité, mais il faut souligner que dans la majorité des cas, il n'y a pas d'informations éco-toxicologiques, ni d'informations sur la cancérogénicité ou la possibilité de bioaccumulation dans la chaîne alimentaire. En outre, on ne sait presque rien des effets toxiques sur les insectes, les organismes du sol et de l'eau. Un certain nombre de métabolites que l'on est certain de trouver dans l'eau sont mis en évidence (en gras et soulignés).

Famille	Ingrédient actif	Métabolites dérivés de la substance active	Quelques informations sur les dérivés de la substance active ⁵³³
Benzimidazoles	bénomil (F)	<u>carbendazime</u>	Le carbendazime a une activité fongicide comme principe actif de départ. Chez les rats adultes, le carbendazime altère la production de sperme et le développement testiculaire. Lorsque le bénomyl et le carbendazime sont administrés ensemble à des rats par voie orale, une incidence accrue de tumeurs hépatocellulaires est observée. Chez les souris femelles, le carbendazime produit une augmentation statistiquement significative de l'incidence des néoplasmes hépatocellulaires. Il est tératogène, altère le développement des mammifères in utero et est très toxique pour les organismes aquatiques.
Benzonitrile	dichlobénil (E)	<u>2,6-dichlorobenzamide</u>	On peut le trouver dans les sols, les fruits et les feuilles des vergers (par exemple, les vergers de pommiers).
Benzotiadiazine	bentazone (E)	6-hydroxybentazone, 8-hydroxybentazone, <u>2-amino-N-isopropylbenzamide (AIBA)</u>	La 6-Hydroxybenzone est formée par les micro-organismes du sol.
	carbaryl (I)	<u>1-naphtol</u>	Il est formé par les micro-organismes du sol et est le principal métabolite du carbaryl. Le 1-Naphtol, lors de la chloration de l'eau (effectuée pour combattre les micro-organismes potentiellement dangereux),

			peut donner des produits susceptibles de former des adduits à l'ADN et d'être génotoxiques (dans les lignées cellulaires humaines). Pour les organismes aquatiques, il est beaucoup plus toxique que le composé de départ et peut se bioaccumuler dans les poissons et autres organismes (FBC ou facteur de bioconcentration de 86).
Carbamates	aldicarbe (I)	<u>aldicarbe sulfoxyde,</u> <u>aldicarbe sulfone</u>	L'aldicarbe sulfoxyde et l'aldicarbe sulfone sont tous deux de puissants inhibiteurs de la cholinestérase, environ 76 fois plus puissants que le composé de départ, l'aldicarbe. L'aldicarbe-sulfone peut provenir de l'aldicarbe-sulfoxyde à la suite d'une dégradation par des micro-organismes du sol et présente une toxicité aiguë, lorsqu'il est administré par voie orale, environ 25 fois supérieure à celle du composé parent. Il a été trouvé dans le sol 2 ans après l'application du composé parent.
	benfuracarbe (I)	<u>carbofuran,</u> <u>3-cétocarbofuran,</u> <u>3-</u> <u>hydroxycarbofuran,</u> carbofuran-phénol	Le carbofuran se retrouve dans les eaux souterraines 12 à 16 mois après l'application sur les cultures de pommes de terre et de blé, jusqu'à des concentrations de 30 µg/L. Il s'agit d'un métabolite produit par des micro-organismes dans le sol mais aussi par des animaux et des plantes (comme le 3-cétocarbofuran qui peut être dérivé du carbofuran). Il s'agit d'un métabolite produit par des micro-organismes dans le sol, mais aussi par des animaux et des plantes (comme le 3-cétocarbofuran qui peut être dérivé du carbofuran). Des échanges de chromatides entre frères et sœurs et des mutations ont été observés dans les lymphocytes humains. Le 3-Hydroxycarbofuran est un métabolite produit par des micro-organismes du sol, des plantes et des animaux. Le 3-Ketocarbofuran est détecté dans l'urine des souris et des rats après administration orale du composé parent et dans l'urine, les fèces et le lait des bovins après exposition au composé parent. Les dérivés nitreux de ce métabolite, qui se formeraient dans l'estomac humain, se sont révélés mutagènes lors de tests sur <i>Salmonella typhimurium</i> et ont provoqué des aberrations chromosomiques dans les cellules. Le carbofuran-phénol est persistant dans le sol et on le retrouve jusqu'à 90 jours après l'application du composé de départ. Le carbofuran et/ou ses principaux métabolites peuvent traverser la barrière placentaire.
	manèbe, mancozèbe et zinèbe (F)	<u>éthylènediourée</u> <u>(ETU)</u>	Il est produit par la dégradation des micro-organismes du sol et peut être détecté dans des échantillons de fruits et légumes. On a découvert qu'il possède des propriétés

			mutagènes, tératogènes et cancérigènes. L'Agence américaine de protection de l'environnement (EPA) a classé l'éthylènthiourée dans le groupe B2 des substances probablement cancérigènes pour l'homme.
	méthiocarbe (I)	<u>méthiocarbe-sulfone,</u> <u>méthiocarbe-sulfoxyde</u>	La méthiocarbe-sulfone et le méthiocarbe-sulfoxyde sont des produits du métabolisme des micro-organismes dans le sol, les plantes et les animaux (par exemple dans le foie de rat). Ce sont des inhibiteurs de l'acétylcholinestérase.
	<u>molinate</u> (E)	<u>molinate-sulfone,</u> <u>molinate-sulphoxyde</u>	Des études in vitro (sur des cultures cellulaires en laboratoire) ont confirmé la capacité des deux métabolites à agir comme de puissants inhibiteurs d'estérase chez le rat. Dans les testicules, le molinate-sulfoxyde inhibe la synthèse de la testostérone par les cellules de Leydig et l'activité des estérases ; il provoque également des altérations dans les spermatozoïdes comme le composé parent.
	thiobencarbe (E)	<u>thiobencarbe-sulphoxyde</u>	Il s'est révélé positif dans l'essai de mutagénèse sur <i>Salmonella typhimurium</i> , bien que dans une moindre mesure que le composé parent.
Cyclaniques	endosulfan (I)	<u>sulfate d'endosulfan</u>	Il s'agit d'un métabolite formé dans les plantes et les mammifères. Dans les milieux aquatiques, il a tendance à être adsorbé dans les sédiments et peut être bioaccumulé car il est très persistant. Dans le sol, il est dégradé très lentement par rapport à son composé parent (demi-vie supérieure à 150 jours). Il semble être le métabolite le plus fréquemment retrouvé dans les tissus, les organes et les fèces des rats traités par des doses orales ou intrapéritonéales d'endosulfan (4-8 mg/kg). Une grande quantité a été trouvée dans le foie de rats 24 heures après une dose unique d'endosulfan. Les vaches nourries à l'endosulfan (2,5-5 mg/kg) pendant 30 jours ont libéré du sulfate d'endosulfan dans le lait à des concentrations de 0,2 mg/kg. Un facteur de bioconcentration d'environ 130 a été estimé.
Chloroacétanilides	alachlore (E)	<u>2,6-diéthylaniline,</u> <u>2-chloro-2',6'-diéthylacétanilide,</u> <u>2-Hydroxy-2',6'-diéthylacétanilide,</u> <u>alachlor-éthanesulfonate (ESA)</u>	La 2,6-diéthylaniline est un produit de l'alachlore généré par le métabolisme des mammifères, des micro-organismes du sol et des larves d'insectes aquatiques. Dans le foie des rats, il peut être transformé en 2,6-diéthylnitrosobenzène, qui est un puissant mutagène (test d'Ames). Un FBC (facteur de bioconcentration) de 120 a été signalé chez le <i>gambusia</i> (poisson <i>Gambusia</i>) qui est un petit poisson d'eau douce. Le 2-chloro-2',6'-diéthylacétanilide se

			forme à la suite de réactions biotiques et de la photodégradation. Dans les plantes, elle est formée par une dégradation rapide du composé parent et est ensuite convertie en 2,6-diéthylaniline.
	métolachlore (E)	2-éthyl-6-méthylaniline, <u>métolachlore-éthanesulfonate (ESA)</u>	La 2-Ethyl-6-méthylaniline est un mutagène potentiel.
Chlorotriazine	atrazine (E)	<u>déséthylatrazine (DEA),déisopropylatrazine (DIA)</u>	La déséthylatrazine (DEA) se retrouve facilement dans l'eau potable et est phytotoxique comme l'atrazine. Dans l'hypophyse et l'hypothalamus des rats, il modifie l'activité de certaines enzymes qui métabolisent la testostérone et réduit les récepteurs des hormones prostatiques. Un facteur de bioconcentration de 8,3 a été enregistré dans les organismes aquatiques. La déisopropylatrazine (DIA) est un produit de dégradation des herbicides atrazine, simazine et, dans une faible mesure, cyanazine. Il est plus soluble que les composés dont il est dérivé et a été trouvé dans les eaux souterraines à des concentrations plus élevées que son composé parent.
	simazine (E)	<u>déisopropylatrazine (DIA)</u>	<i>Voir ci-dessus</i>
	terbuthylazine (E)	<u>déisopropylatrazine (DIA),déséthylterbutylazine (DET)</u>	Après l'application de terbuthylazine sur le sol, une augmentation du métabolite dexetylterbuthylazine (DET) a été observée du 12e au 45e jour.
Dérivés d'acides phénoxy-carboxyliques	2,4-DB (E)	<u>2,4-D, 2,4-dichlorophénol</u>	En plus d'être un métabolite du 2,4-DB, le 2,4-D est lui-même un herbicide. Le 2,4-D est formé dans le sol par le métabolisme microbien et dans les plantes. Le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC) a classé les herbicides chlorophénoxy dans le groupe 2B, c'est-à-dire comme potentiellement cancérogènes pour l'homme. Le 2,4-dichlorophénol est également un métabolite du 2,4-D (par exemple dans les plantes). Dans divers produits de la pêche, il est enregistré à des concentrations comprises entre 0,1 et 14 mg/kg ; on le trouve également dans des plantes telles que les céréales et les fraises.
	MCPB1 (E)	<u>MCPA,</u> 4-chloro-2-méthylphénol	Le métabolite MCPA est lui-même un herbicide. Il est issu du métabolisme des micro-organismes présents dans le sol, les plantes et les animaux. Chez le rat, il est rapidement absorbé et éliminé, principalement dans l'urine et se lie partiellement à l'albumine plasmatique. Il est facilement absorbé dans l'intestin du rat. Après l'exposition, il a été retrouvé dans tous les organes des rats examinés (il est

			<p>métabolisé dans le foie). Le MCPA, chez les rats exposés par voie orale, est éliminé en 24 heures (90% dans les urines et 7% dans les fèces). Chez l'homme, 50% de la dose totale a été retrouvée dans les urines dans les 48 heures suivant le traitement. Il est classé par le CIRC comme une substance du groupe 2B, c'est-à-dire une substance potentiellement cancérogène pour l'homme.</p> <p>Le 4-chloro-2-méthylphénol est également un métabolite du MCPA et on lui a trouvé un FBC de 76,3 (facteur de bioconcentration).</p>
Dithiocarbamates	métam-sodium (F)	<u>méthylisothiocyanate</u>	Il présente des propriétés fongicides, nématicides et herbicides.
Phénylurées	chlorotoluron (E)	3-chloro-4-méthylaniline	Il provoque l'anémie et la méthémoglobinémie*, interfère avec le système endocrinien et est phytotoxique.
	diuron (E)	monuron, 1-(3,4-dichlorophényl)urée (DCPU), 4-chlorophénylurée (CPU), <u>3,4-dichloroaniline (DCA)</u>	La 1-(3,4-dichlorophényl)urée (DCPU) interagit avec le système endocrinien et est un puissant inhibiteur de la photosynthèse (en particulier du photosystème II). La 3,4-dichloroaniline (DCA) est un produit de la dégradation des herbicides diuron, linuron et propanil qui se produit dans le sol. C'est également un intermédiaire dans la production industrielle de nombreux produits agricoles. Il interagit avec le système endocrinien et est néphrotoxique chez les rats. Dans les études sur les mammifères, il a été trouvé responsable de formes de cyanose. Des effets sublétaux ont été observés chez les organismes d'eau douce et marins à des concentrations comprises entre 0,01 et 1 mg/L.
	linuron (E)	1-(3,4-dichlorophényl)urée (DCPU), <u>3,4-dichloroaniline (DCA)</u>	La 1-(3,4-dichlorophényl)urée (DCPU) a été trouvée dans l'urine de rats traités au linuron. Du 3,4-dichloroaniline (DCA) a été détecté dans des carottes, 117 jours après le traitement au linuron.
	monolinuron (E)	<u>4-chloroaniline,</u> 4-chlorophénylurée (CPU)	La 4-chloroaniline peut également être rejetée dans l'environnement lors du traitement des intermédiaires pour les teintures, les pesticides et les produits pharmaceutiques. Peut provoquer une méthémoglobinémie*. Des dommages à l'ADN, des mutations et des aberrations chromosomiques ont été observés (dans des études <i>in vivo</i>). Il est classé par le CIRC dans le groupe 2B : cancérogène possible pour l'homme. Il est très toxique pour les insectes, dangereux pour les crustacés d'eau douce (<i>Daphnia</i>) et les embryons de grenouilles d'eau (<i>Xenopus</i>).
	méthobromuron (E)	<u>4-bromoaniline</u>	Il a été détecté dans les sols des plantations de tabac traitées au méthobromuron. Chez

			l'homme, il peut provoquer une méthémoglobinémie* et de probables lésions hépatiques et rénales.
Phosphonates	glyphosate (E)	<u>acide aminométhylphosphorique (AMPA)</u>	C'est un produit de dégradation dans le sol mais c'est aussi le principal métabolite dans les plantes et il est phytotoxique. Il est très persistant dans le sol : sa demi-vie est comprise entre 240 et 958 jours.
Phosphororganiques	fénamiphos (I)	fenamiphos-sulfone, sulfoxyde de fénamiphos	Le fenamiphos-sulfone et le fenamiphos-sulfoxyde ont des propriétés nématocides similaires à celles du composé parent et sont de puissants inhibiteurs de l'acétylcholinestérase. Le sulfoxyde atteint sa concentration maximale dans la plupart des sols en 3 semaines environ, ce qui correspond à la demi-vie de son composé parent.
	disulfoton (I)	<u>disulfoton-sulfone, disulfoton-sulfoxyde</u>	Le disulfoton-sulfone et le disulfoton-sulfoxyde sont des métabolites présents dans l'urine des rats exposés au disulfoton par voie orale. Dans le sol, le disulfoton-sulfone a une demi-vie comprise entre 120 et 294 jours. Il est très toxique pour les mammifères et les invertébrés d'eau douce. Du disulfoton-sulfoxyde a été détecté dans les eaux de surface après un épisode de pluie suivant l'application de disulfoton sur le terrain, à des concentrations allant de 29,5 à 48,7 µg/L. Il inhibe la cholinestérase, est toxique pour les mammifères, et très toxique pour les oiseaux et les invertébrés d'eau douce.
Propionanilide	propanil (E)	3,3,4,4-tétrachloroazobenzène (TCAB), 3,4-dichloroaniline (DCA)	Le 3,3,4,4-tétrachloroazobenzène (TCAB) est présent comme impureté de la 3,4-dichloroaniline et des herbicides propanil, linuron et diuron. Il est formé par la photodégradation de la 3,4-dichloroaniline. Il est plus persistant que son composé parent (propanil) et a été détecté dans des sols cultivés avec du riz. Il est plus toxique que son composé parent : les symptômes décrits sont la chloracné et la méthémoglobinémie ¹ . Il a montré des propriétés similaires à celles de la dioxine chez les rats et les souris.
Thionophosphates	chlorpyrifos (I)	<u>3,5,6-trichloro-2-pyridinol (TCP)</u> , chlorpyrifos-oxon	Le 3,5,6-trichloro-2-pyridinol (TCP) est le principal produit de dégradation des insecticides chlorpyrifos et chlorpyrifos-méthyl. Il est également issu de la dégradation de l'herbicide triclopyr. Il s'agit

¹ La méthémoglobine est une forme d'hémoglobine métallo-protéique, dans laquelle le fer du groupe hème est à l'état Fe³⁺ (ferrique), au lieu de Fe²⁺ (ferreux) dans l'hémoglobine normale. Le changement d'état d'oxydation prive la molécule de sa capacité à fixer l'oxygène de manière réversible et, par conséquent, elle perd sa fonction physiologique de transport de l'oxygène vers les tissus. Dans le sang humain, une quantité infime de méthémoglobine est normalement produite spontanément, mais lorsqu'elle est présente en excès, le sang devient anormalement brun bleuâtre foncé. ⁴⁴⁵

			d'un métabolite des micro-organismes présents dans le sol, les plantes et les animaux. Chez les animaux, le chlorpyrifos-oxon est environ 3.000 fois plus toxique pour le système nerveux que son composé parent (le chlorpyrifos).
	diazinon (I)	diazoxon, oxy-pyrimidine	Le diazoxon est un inhibiteur d'enzyme plus puissant que le composé de départ. L'oxy-pyrimidine est formée par hydrolyse du composé parent ou du métabolite diazoxon. Il est beaucoup plus persistant et mobile dans le sol que le composé d'origine.

Légende : I = insecticides ; E = herbicides ; F = fongicides.

NOUS DEVONS DÉPLASTIFIER NOS VIES

Lorsque nous parlons de plastique, il s'agit en fait de milliers de molécules chimiques différentes, dont la plupart sont des polymères synthétiques dérivés du pétrole. Parmi les substances les plus connues figurent le chlorure de polyvinyle (synthétisé en 1931), le nylon et le plexiglas (synthétisés en 1938) et le polypropylène (découvert par l'Italien Giulio Natta en 1954 et commercialisé sous le nom de Moplen).^{982, 983} Les plastiques ne sont pas biodégradables et les temps de dégradation sont extrêmement longs : 600 ans pour le nylon (par exemple, les lignes de pêche), 850 ans pour le polystyrène ou au moins 1000 ans pour une assiette ou une bouteille en plastique. Certains polymères peuvent être synthétisés à partir de matières végétales, comme le polyéthylène et le polyamide, mais tous les polymères biosourcés ne sont pas biodégradables.

Environ 4% de tous les combustibles fossiles extraits dans le monde sont utilisés pour produire des plastiques, dont au moins un tiers sert à fabriquer des emballages. En 2015, plus de 320 millions de tonnes de résines plastiques ont été produites, dont 79% sont perdus dans l'environnement et les décharges : 12% du plastique a été incinéré et 9% a été recyclé. La quantité de plastique qui finit dans la mer varie entre 5 et 13 millions de tonnes par an. Les engins de pêche représentent 23% du total des débris trouvés dans la mer.⁹⁸² Certains plastiques sont moins denses que l'eau et ont donc tendance à flotter : le polyéthylène (bouteilles), le polypropylène, le polystyrène ; d'autres plastiques ont tendance à couler comme le nylon, le chlorure de polyvinyle et le polyéthylène téréphtalate. Les plastiques flottants, en raison des courants de surface, ont tendance à se concentrer dans certaines zones, formant des "îles de plastique flottantes" qui peuvent être plus grandes que la taille d'un pays comme l'Italie. Il existe au moins 11 grandes îles flottantes en plastique dans les mers.⁹⁸⁴

Dans les équilibres fragiles, dynamiques et étroitement liés entre l'air, le sol et l'eau, la pollution génère des phénomènes catastrophiques. L'apport de polluants dans l'eau altère la capacité des organismes marins à survivre et à rendre des services utiles et nécessaires à la survie de l'espèce humaine également. Dans les océans, la photosynthèse génère environ 50% de l'oxygène que nous respirons. Dans un litre d'eau, il peut y avoir 200 milliards de virus et 20 milliards de bactéries. Les espèces qui composent le *plancton* ne servent pas seulement à nourrir les poissons et les baleines, mais se répartissent également entre proies et prédateurs, parasites et hôtes, et organismes vivant en symbiose les uns avec les autres. Ce qui distingue la présence du *plancton* dans les océans, qui représente 90% de la masse de toute la vie marine, c'est le niveau de chaleur de l'eau. La découverte que la température détermine les espèces présentes dans une zone est très importante à la lumière du changement climatique en cours.⁷⁸³

Des milliers d'espèces de micro-organismes vivent dans les eaux de surface qui sont atteintes par la lumière du soleil et produisent 50% de l'oxygène de la planète par photosynthèse. Une partie de l'oxygène généré dans les océans, probablement jusqu'à 10%, est produite par une bactérie : *Prochlorococcus*. Il s'agit de la bactérie photosynthétique la plus abondante dans les océans : une cyanobactérie identifiée pour la première fois en 1988.^{693, 780} Cette bactérie n'a été découverte que récemment, bien qu'elle soit l'un des organismes les plus abondants dans les mers tropicales et subtropicales de la planète et que nous lui devons peut-être une respiration sur 10. Elle vit à des profondeurs allant jusqu'à 200 m et peut atteindre une densité de plus de cent mille bactéries par millilitre : elle pourrait constituer entre 20 et 40% de la biomasse photosynthétique marine en haute mer (entre 40° de latitude Nord et 40° de latitude Sud).

Jusqu'à présent, nous nous sommes préoccupés de l'ingestion ou du piégeage de plus gros animaux, mais la menace la plus dangereuse est plus subtile. Diverses substances sont utilisées dans la production de plastiques, telles que des catalyseurs, des solvants, des plastifiants, des antimicrobiens, des antioxydants, des substances qui protègent les polymères des rayons ultraviolets, des retardateurs de flamme, des métaux, des colorants, etc. Ces substances se retrouvent dans l'eau (par exemple dans les estuaires des rivières) à des concentrations élevées (microgrammes par litre). Dans la mer, certaines de ces substances, comme celles contenues dans le chlorure de polyvinyle (PVC) et le polyéthylène (PEHD ou polyéthylène haute densité, qui est le matériau le plus utilisé pour produire des sacs en plastique), sont libérées lentement, même un an après le déversement.

Parmi les effets générés par les plastiques sur le plus important micro-organisme photosynthétique (*Prochlorococcus*) sont connus :

- la réduction de la croissance ;
- une réduction de l'efficacité photosynthétique et une baisse de la production d'oxygène ;
- en modifiant l'expression de gènes, comme ceux qui permettent la photosynthèse.

Le plastique placé dans les mers sape les fonctions vitales de base de ce micro-organisme marin et la capacité des océans à produire de l'oxygène, ce qui est très évident dans certaines zones.⁷⁸²

L'étendue des zones marines où le manque d'oxygène, au point de compromettre la vie marine, a doublé tous les dix ans et cette tendance s'accroît.⁹⁸⁸ Ces zones sont appelées zones mortes et constituent une menace sérieuse pour l'écosystème marin.

Nous avons découvert que l'exposition aux produits chimiques, dispersés par la pollution plastique, interfère avec la croissance, la photosynthèse et la production d'oxygène de *Prochlorococcus* (et d'autres).⁷⁸¹

Le plastique envahit les océans, à raison de 8 millions de tonnes chaque année, et on estime qu'il y en a au moins 165 millions au total. En 2050, le plastique sera plus abondant que le poisson (plus de 2 millions de tonnes se déversent dans les océans par les rivières) ; aujourd'hui, on estime qu'il y a au moins une tonne de plastique pour cinq tonnes de poisson.^{979, 980} Sur la planète, les bouteilles en plastique (par exemple en PET) utilisées pour transporter de l'eau ont été produites en 2018 au rythme d'au moins un million par minute - un gaspillage insoutenable. Probablement 70% du plastique finit dans les profondeurs, de sorte que les énormes zones couvertes par les matériaux flottants ne sont que la partie émergée de l'iceberg.⁹⁷⁷ Dans certaines régions de la planète, la situation est dramatique : dans les mers de Californie, le poids (sec) du plastique est six fois supérieur à celui du plancton.⁹⁸⁰ Des études révèlent que, dans la planète, on trouve des matériaux plastiques dans jusqu'à 90% des oiseaux de mer examinés.⁹⁸⁰ La mer Méditerranée représente 0,3% du volume total des océans mais reçoit au moins 4% des plastiques rejetés dans les mers de la planète.⁹⁸²

Entre 2009 et 2013, des échantillons de 35.000 espèces de micro-organismes marins qui composent le *plancton* ont été prélevés dans les océans : les plus petits de 0,02 micromètre (millièmes de millimètre), les plus grands de deux millimètres. Ce kaléidoscope de vie, qui est également à la base de toute la chaîne alimentaire de la mer, est animé par 40 millions de gènes.

Grâce aux technologies avancées de séquençage du génome, les 35.000 espèces de *plancton* analysées ont fourni aux chercheurs une sorte de carte ADN de la mer. À titre de comparaison, l'homme possède 20.000 gènes, mais chacun d'entre nous héberge suffisamment de bactéries pour réunir 10 millions de gènes, dont 73% sont identiques à ceux du plancton examiné.⁷⁸³ Une partie de la mer semble donc vivre en nous aussi. Il est utile de rappeler que le nombre moyen de bactéries dans notre corps est au moins dix fois supérieur au nombre de cellules dans notre corps (l'ensemble de ces micro-organismes largement symbiotiques, utiles et indispensables est appelé le *microbiome*). Cela est possible car les bactéries sont beaucoup plus petites que les cellules humaines. Au moins 500 espèces différentes de bactéries ont été identifiées dans la seule bouche, et si la taxonomie biologique devait se fonder uniquement sur l'abondance de l'ADN dans chaque organisme, les humains pourraient être classés comme une communauté de bactéries hébergées par des cellules eucaryotes. Personne ne sait combien de bactéries sont présentes dans la biosphère, mais il y en a certainement beaucoup plus que ce que nous avons classé. On a trouvé des bactéries dans des tunnels de 2,8 km de profondeur (mines d'or en Afrique du Sud) qui peuvent survivre à +60°C, en l'absence de lumière et d'oxygène (*Desulforidus audaxviator*).⁷⁹³ L'aspect le plus surprenant de cette bactérie extrêmophile est qu'elle n'a probablement pas besoin d'interagir avec d'autres organismes pour survivre. Ses caractéristiques particulières le rendent capable de survivre dans des conditions extrêmes, comme celles qui règnent sous les calottes glaciaires des lunes, par exemple Europe, le quatrième plus grand satellite de Jupiter.⁷⁹⁴

Selon les estimations actuelles, la quantité de déchets plastiques laissés dans l'environnement pourrait être multipliée par dix au cours des dix prochaines années et, par conséquent, son impact sur la mer sera encore plus important. La propagation des plastiques dans la biosphère est beaucoup plus importante qu'on ne le pensait auparavant. Du polyester, du polyamide, du polyéthylène et du polypropylène, c'est-à-dire du plastique, sont trouvés pour la première fois sur un glacier italien (de l'ordre de 75 particules par kilogramme) : celui du parc national du Stelvio.⁷⁸⁴ Avec la prudence qui s'impose, on a estimé que la langue du glacier Forni (dans le parc national du Stelvio), l'un des plus importants corps glaciaires d'Italie, pourrait contenir entre 131 et 162 millions de particules de plastique. L'origine de ces particules peut être soit locale, par exemple en raison de la libération et de l'usure des vêtements et de l'équipement des alpinistes et des randonneurs fréquentant le glacier, soit diffuse, c'est-à-dire des particules transportées par les masses d'air.⁷⁸⁵ La solution la plus efficace devrait être d'interdire l'utilisation de plastiques jetables et d'améliorer la gestion des déchets.

Il faut beaucoup d'efforts pour essayer de connaître au moins une partie des effets générés sur les écosystèmes et notre santé par les milliers de nouvelles molécules qui sont libérées dans l'environnement. Par exemple, quel sera l'effet des 6.000 tonnes de crème solaire que les humains déversent dans l'eau lorsqu'ils plongent ? On sait déjà que certains habitants de la mer peuvent être gravement blessés.⁸⁷⁴

L'une des premières mentions de poissons morts à cause du plastique remonte probablement à 1931 : un requin coincé dans un pneu.⁹⁸² En 1966, on a trouvé du plastique dans le tube digestif de poussins d'albatros morts. Depuis lors, on a trouvé du plastique dans des organismes marins tels que des phoques, des poissons et des morses. L'une des premières baleines à mourir de l'ingestion de plastique a été retrouvée échouée au milieu des années 1970. L'ingestion peut être directe (les tortues prennent le plastique flottant pour leur proie, les méduses ou les oiseaux de mer pour les mollusques) ou indirecte (par l'intermédiaire de leur proie). Le nombre d'espèces marines dans lesquelles on trouve du plastique est en augmentation : au moins 164 espèces d'oiseaux marins, 92 espèces de poissons et 62 espèces de mammifères marins.⁹⁸² Les plastiques causent des dommages même lorsqu'ils ne sont pas ingérés car ils peuvent, par exemple, piéger les animaux.

Le plastique flottant aide à ancrer et à transporter des centaines d'espèces marines, ce qui leur permet de se déplacer plus facilement sur de plus longues distances. Il s'agit d'une propagation potentielle d'espèces exotiques, un phénomène déjà enregistré en 2011 : à cause d'un tsunami, les matériaux flottants ont permis le transport de dizaines d'espèces du Japon vers la côte américaine, où elles n'existent pas.

Dans les océans, en raison de divers phénomènes tels que l'érosion, le plastique se décompose en petits morceaux jusqu'à devenir invisible. Les microplastiques (de la taille d'un millième de millimètre) sont présents partout, non seulement dans les océans mais aussi dans les glaciers et dans notre corps. En fait, les microplastiques ne sont pas seulement générés par la dégradation des plastiques, car ils sont utilisés dans de nombreux produits tels que les cosmétiques, le dentifrice, les pesticides (micro-encapsulés) et les médicaments. Une autre source de morceaux microscopiques de plastique est le lavage ménager qui détache les fibres des vêtements (des milliers par vêtement et par lavage). Ces microplastiques se retrouvent dans les fonds marins profonds tels que la fosse des Mariannes (à une profondeur d'environ 11.000 m dans les abysses, on enregistre près de 2.000 microfibrilles par litre).

Les microplastiques sont capables de se déplacer à l'intérieur des êtres vivants et peuvent se retrouver non seulement dans le tube digestif mais aussi dans d'autres organes tels que le système respiratoire. Certains matériaux lipophiles peuvent facilement traverser les membranes et pénétrer dans les cellules. Les plastiques contiennent des substances très dangereuses qui sont persistantes, bioaccumulables et toxiques. Il a été démontré que certaines de ces substances ont des effets négatifs sur la reproduction, la division cellulaire (cancer), le système immunitaire et le système endocrinien. Parmi les molécules incriminées figurent les phtalates, qui sont utilisés en grande quantité (jusqu'à 60% en poids) pour produire du polychlorure de vinyle (PVC). Les phtalates sont produits dans des quantités dépassant 12 millions de tonnes par an (2013) et sont soupçonnés d'être des perturbateurs endocriniens (ils peuvent enregistrer une activité œstrogénique et, par conséquent, altérer la reproduction). Le PVC peut libérer des substances cancérigènes telles que le chlorure de vinyle.

Une autre catégorie de substances dangereuses ajoutées volontairement sont les retardateurs de flamme tels que les composés organiques bromés (ces substances sont également des perturbateurs endocriniens potentiels).

Parmi les nombreuses substances qui sont ajoutées aux polymères plastiques, on trouve des solvants, des catalyseurs, des tensioactifs, des stabilisants (certaines de ces substances contiennent des métaux). Pour la plupart des substances utilisées et rejetées dans l'environnement, on ne dispose pas de suffisamment d'informations pour établir leur dangerosité pour l'homme et les autres êtres vivants. Malheureusement, les microplastiques et diverses molécules contenues dans les plastiques se retrouvent également dans notre organisme, par exemple dans les matières fécales. La contamination se fait d'une part par les poissons, d'autre part par le transfert des matériaux d'emballage vers les aliments ou les boissons qu'ils contiennent (par exemple, certains phtalates ou microplastiques transférés des bouteilles contenant de l'eau). Au moins un tiers de la production de plastiques est destinée aux emballages.

Le sel de table (chlorure de sodium) extrait de l'eau de mer dans des bacs à sel s'avère être riche en plastique, quelle que soit sa provenance sur la planète (jusqu'à des milliers de particules par kilogramme).

Un chiffre alarmant est que nous pouvons ingérer plusieurs grammes de plastique par semaine (dont quelques milligrammes peuvent être contenus dans un litre d'eau en bouteille).⁹⁸² Parmi les principales sources d'exposition humaine aux plastiques figurent l'eau en bouteille et les produits de la pêche. Par exemple, les phtalates sont présents dans le sang, l'urine, le lait maternel et le liquide amniotique.⁹⁸² Certaines substances peuvent également atteindre

facilement le cerveau, comme l'a montré la découverte de polystyrène dans le cerveau des poissons. Dans l'intestin humain, le polystyrène peut altérer l'absorption du fer.

On a également constaté que le miel était contaminé par des fibres polymères (170 par kilogramme), qui pourraient provenir de la somme de celles prélevées sur les abeilles dans l'environnement (pensons aux pesticides micro-encapsulés) et de celles dégagées par les emballages. Les plastiques entrent dans le monde agricole de différentes manières. Une voie de contamination bien connue est le compost, qui peut contenir jusqu'à 4% de plastique, de sorte que plusieurs kilos de plastique par hectare et par an peuvent être distribués sous forme de microparticules.⁷⁴¹ Les autres sources de contamination agricole sont le paillage (les phtalates se retrouvent dans les plantes et le sol), l'irrigation (avec des tuyaux en plastique dans les champs de maïs, par exemple) et les boues d'épuration (les microplastiques seront distribués à la fois par l'irrigation et l'utilisation des boues à des fins agricoles et environnementales). Pour confirmer la dangereuse expérience en cours, les phtalates sont également présents dans les vers de terre.⁹⁸²

Les microplastiques, c'est-à-dire ceux dont le diamètre est inférieur à 5 mm (particules qui peuvent être aussi petites que quelques millièmes de millimètre), sont ingérés par divers organismes marins tels que les coquillages, y compris ceux utilisés pour la consommation humaine. 84% des huîtres élevées en Chine contiennent des microplastiques. L'examen du contenu du système digestif de sept espèces de mollusques provenant de deux importantes zones d'aquaculture chinoises confirme la contamination généralisée : entre 70% et 100% des échantillons de différentes espèces de mollusques étaient contaminés par des microplastiques.¹²⁵⁹ La taille des fibres synthétiques trouvées à l'intérieur de ces organismes filtrants varie entre 10 et 5.000 µm, mais la taille la plus fréquente est inférieure à 500 µm. Les fibres sont identifiées par neuf couleurs différentes et au moins 18 types de polymères différents sont confirmés (le plus fréquent était la rayonne, suivi du polyéthylène chloré, du chlorure de polyvinyle ou PVC, du polyéthylène ou PET, du fluorure de polyvinylidène ou PVDF, du polytétrafluoroéthylène ou PTFE, et d'autres comme le polyacrylonitrile ou PAN).¹²⁵⁹ D'autres recherches confirment également la contamination par les microplastiques de coquillages provenant du monde entier : Inde, Vietnam, Italie, France, Royaume-Uni, Canada et États-Unis.^{1259, 1260, 1261}

Les microplastiques envahissent les océans et peuvent donc se retrouver dans de nombreux produits de la pêche et de l'aquaculture importants pour la consommation humaine, tels que le calmar (céphalopode) et le crabe (crustacé) pêchés en Inde, qui peuvent contenir entre 3 et 20 particules (entre 100 µm et 5 mm) par kilogramme de partie comestible (5 couleurs ont été identifiées et les polymères les plus fréquemment retrouvés sont : le polypropylène suivi du polyéthylène et du polystyrène).¹²⁶⁰

Dans le monde, la consommation annuelle de produits de la pêche et de l'aquaculture (par exemple, les moules et les huîtres) dépasse 125 millions de tonnes par an, de sorte que même quelques dizaines de fragments de microplastiques par kilogramme représentent une exposition potentiellement dangereuse.¹²⁶¹ Les consommateurs européens de produits aquacoles tels que les moules et les huîtres peuvent ingérer entre 1.800 et 11.000 fragments de microplastique par an en consommant deux espèces d'élevage (*Mytilus edulis* et *Crassostrea gigas*).¹²⁶¹

Ces données confirment que la consommation de coquillages et d'autres produits de la pêche constitue un danger potentiel pour la santé humaine en raison de l'ingestion de polymères synthétiques et d'autres substances (polybromodiphényléthers ou PBDE, qui sont des retardateurs de flamme, polychlorobiphényles ou PCB, phtalates et bisphénol A ou BPA).¹²⁶¹ Les fragments de microplastique plus petits (inférieurs à 130 µm) peuvent être transloqués dans les tissus du corps humain et libérer des substances toxiques.

L'examen de l'exposition aux microplastiques chez les Américains révèle un risque potentiel :¹²⁶²

- Par la consommation d'eau en bouteille, une moyenne de 94 microplastiques est ingérée par litre (on considère une moyenne de 0,44 litre par jour) tandis que par l'eau de l'aqueduc on estime une concentration d'environ 4 microparticules par litre. Ainsi, l'eau en bouteille contient au moins 23 fois plus de microparticules par litre que l'eau du robinet. Les boissons alcoolisées peuvent contenir une moyenne de 32 microplastiques par litre.
- Entre 97 et 170 microplastiques sont inhalés par jour par la respiration (entre 35.000 et 62.000 micro-polymères par an).
- Par la consommation de nourriture et d'eau, on est exposé à entre 106 et 126 microplastiques par jour (entre 39.000 et 52.000 micro-polymères par an). La consommation de produits de la pêche ainsi que les boissons en plastique sont des sources importantes d'exposition.

Globalement, l'ingestion et l'inhalation génèrent une exposition des Américains comprise entre 74.000 et 114.000 particules telles que des fibres et des fragments de polymères synthétiques par an (selon le sexe et l'âge).¹²⁶² Ces chiffres, bien qu'alarmants, sont une sous-estimation car la consommation alimentaire n'est évaluée que pour une fraction des aliments, à savoir 15% de l'apport calorique, et la consommation d'eau et de boissons dans des bouteilles en plastique peut être beaucoup plus élevée que ce qui est considéré.

Malheureusement, les microplastiques représentent également un danger pour la santé des organismes marins, mais on dispose d'encore moins d'informations sur cet aspect : l'ingestion de plastiques favorise le transfert de la résistance aux antibiotiques par l'absorption de micro-organismes adhérant aux polymères (les microplastiques sont colonisés par des bactéries), favorise le stress oxydatif, les dommages cellulaires et l'empoisonnement par diverses substances toxiques.¹²⁶⁰

Ce ne sont là que quelques-uns des aspects négatifs de la production de plastique ; en réalité, les externalités et les conséquences pour la biosphère, les "coûts cachés", sont pour la plupart inconnus. Le modèle de gestion des plastiques est un exemple frappant de la façon dont les intérêts privés sont protégés au détriment de la communauté. Le problème est énorme et nous touche de près ; nous ne pouvons plus l'ignorer. Nous devons abandonner le consumérisme du jetable et adopter la philosophie du refus du jetable : nous devons déplastifier nos vies.

L'ACIDIFICATION DES OCÉANS

Plus ou moins 30% des émissions de dioxyde de carbone finissent dans les océans. Les algues stockent au moins trois milliards de tonnes. À elles seules, les algues, sans compter les autres organismes, ont une biomasse supérieure à celle de toutes les plantes terrestres.¹⁴ En général, les océans contiennent d'énormes quantités de carbone, bien plus que toutes les plantes et tous les animaux terrestres (au moins dix fois plus). L'augmentation du dioxyde de carbone dans les océans accroît l'acidité des eaux de surface : entre 1992 et 2007, le pH des océans est passé de 8,11 à 8,01, c'est-à-dire qu'il est devenu plus acide (les charges électriques positives sont plus élevées que les négatives). On estime que le taux actuel d'acidification des océans est plus élevé qu'il ne l'a été au cours des 20 derniers millions d'années, de sorte que les effets qui en résultent sont imprévisibles et catastrophiques.^{5, 8} De nombreux organismes sont sans aucun doute sensibles aux changements d'acidité, comme ceux qui fabriquent des coquillages et le phytoplancton. Les changements d'acidité et de température des mers provoquent la mort des coraux (phénomène connu sous le nom de "*blanchiment des coraux*") et endommagent le phytoplancton.

Les polypes coralliens hébergent des myriades d'algues unicellulaires dans leur corps : jusqu'à un million par centimètre carré.¹⁴ Les algues réalisent la photosynthèse (synthèse de glucose et

libération d'oxygène) et reçoivent en retour le gaz carbonique produit par le petit animal : le polype du corail. Cette symbiose permet aux polypes coralliens de construire des récifs coralliens dix fois plus vite. Les plus de 700 espèces connues de coraux construisent des structures qui sont des œuvres d'art naturelles. Si les algues quittent les polypes, ils se fanent et meurent. Les rayons ultraviolets, qui peuvent traverser le trou d'ozone, peuvent également tuer le phytoplancton (algues microscopiques) sur de grandes étendues de mer. ¹⁴

Il est probable qu'au moins un habitant de l'océan sur quatre passe une partie de sa vie dans les récifs coralliens. ⁶⁴² Depuis 1980, nous avons détruit au moins 30% des récifs coralliens des eaux tempérées. ¹⁰ Si le rythme actuel des dégâts se maintient, nous pourrions, d'ici une génération, altérer de manière irréversible tous les récifs coralliens de la planète. ⁸

La destruction des écosystèmes marins (par exemple, par la pollution et l'acidification) pourrait entraîner le rejet d'énormes quantités de dioxyde de carbone dans l'atmosphère.

L'EXPLOITATION NON DURABLE DES MERS

Les océans (qui contiennent en moyenne 35 g de chlorure de sodium par kilo d'eau) occupent environ 70% de la surface de la terre (80% dans l'hémisphère sud et 61% dans l'hémisphère nord) et ont une profondeur moyenne de 3,7 km (pour un volume total estimé à $1,3 \times 10^{18} \text{ m}^3$). ²⁵⁹ Malgré l'immensité des mers, nous avons réussi à compromettre cet écosystème également. Au moins un tiers des stocks de poissons sont menacés, et les stocks de poissons tels que le thon, l'espadon, le cabillaud et la plie ont été réduits de 90% en 50 ans. ⁸

La balance penche en faveur de l'homme, même lorsqu'il s'agit de prédateurs aussi redoutables que les requins (on en connaît au moins 470 espèces). Chaque année, une dizaine d'humains meurent à cause des requins, mais plusieurs millions de requins sont tués par l'homme. ¹⁴

La pêche est devenue non durable, dépassant largement la capacité de régénération, passant d'une prise d'au moins 19 millions de tonnes par an en 1950 à plus de 87 millions de tonnes en 2005. ⁵ Un tiers de la vie marine capturée est utilisée pour nourrir les animaux d'élevage (formant des farines pour les porcs, les poulets, les saumons élevés en aquaculture), y compris les animaux domestiques comme les chats. ⁹⁷⁷

En 2018, la production mondiale de poisson a atteint environ 179 millions de tonnes, pour une valeur totale à la première vente estimée à 401 milliards de dollars. Probablement plus de 20% des prises sont des prises accessoires, c'est-à-dire non désirées mais inévitables, comme des tortues, des oiseaux de mer ou des poissons qui ne peuvent pas être utilisés pour la consommation humaine ; le nombre de dauphins, de baleines et de bélugas qui sont victimes de la pêche en tant que prises accessoires est probablement supérieur à 300.000 par an. ⁹⁷⁷ Le rythme actuel de la pêche industrielle peut être considéré comme un massacre programmé, un holocauste écologique si rapide et efficace qu'il est sans précédent : au moins 1.000 milliards de poissons sont pêchés chaque jour. Il s'agit d'une extinction programmée et perpétuée au niveau planétaire. En partie à cause de ce comportement autodestructeur, de 1988 à 2015, la production des pêcheries mondiales a été réduite de plus de 40% : en Méditerranée, les captures en général ont été réduites de plus d'un tiers. ⁹⁸⁷ Il est difficile de suivre les estimations de la prédation dans les mers car elles sont continuellement revues à la baisse, mais nous sommes certains que la récolte se fait à un rythme bien supérieur à la capacité naturelle de régénération et de reproduction. C'est un signal d'alarme sans équivoque, nous devons changer de cap. La pêche doit être réglementée et limitée. L'étendue des zones marines et côtières protégées doit être augmentée.

Les produits de l'aquaculture représentent 46% de la production totale et 52% du poisson destiné à la consommation humaine : depuis les années 1960, nous avons doublé la consommation mondiale de poisson par habitant pour atteindre plus de 20 kg par an. ⁹⁸⁷ La

Chine est de loin le plus grand producteur dans le secteur de l'aquaculture : depuis 1991, elle produit plus d'aliments aquatiques d'élevage que le reste du monde. ⁹ La consommation de poisson représente un sixième de l'apport en protéines animales de la population mondiale et plus de la moitié dans des pays comme le Bangladesh, le Cambodge, la Gambie, le Ghana, l'Indonésie, la Sierra Leone, le Sri Lanka et plusieurs petits États insulaires en développement. Quelques informations sur l'état de la pêche et de l'aquaculture dans le monde sont données ci-dessous : ⁹

- production mondiale de poisson en 2018 : 179 millions de tonnes, dont la production pour la consommation humaine est d'environ 156 millions de tonnes ;
- aquaculture en 2018 : 82,1 millions de tonnes, un nouveau record historique ;
- part de la pêche de capture en mer : 84,4 millions de tonnes ;
- pêche de capture en eau douce : 12,0 millions de tonnes, un record absolu ;
- valeur de première vente de la production de la pêche et de l'aquaculture en 2018 : 401 milliards de dollars, dont la part de l'aquaculture est de 250 milliards de dollars ;
- nombre de personnes employées dans le secteur primaire de la pêche et de l'aquaculture : 59,5 millions, dont 14% de femmes ;
- région qui compte le plus grand nombre de pêcheurs et d'aquaculteurs : l'Asie (85% du total) ;
- nombre de navires de pêche dans le monde : 4,6 millions ;
- la plus grande flotte par région : l'Asie (3,1 millions de navires, soit 68% de la flotte mondiale) ;
- part des bateaux à moteur de moins de 12 mètres : 82% ;
- pourcentage de la production mondiale de poisson impliquée dans le commerce international : 38% ;
- valeur des exportations de produits de la mer : 164 milliards de dollars ;
- premier producteur et exportateur de poisson au monde : la Chine ;
- régions exportatrices nettes de poisson : Océanie, Amérique latine, Caraïbes et pays en développement d'Asie ;
- l'Afrique est un importateur net en termes de volume, mais un exportateur net en termes de valeur ;
- les endroits de la planète qui détiennent le record de la pêche la plus non durable : Méditerranée et mer Noire (62,5% de stocks surexploités), Pacifique Sud-Est (54,5%), Atlantique Sud-Ouest (53,3%) ;
- les fleuves ayant la plus forte production de pêche de capture intérieure : le Mékong, le Nil, l'Ayeyarwady et le Yangtze.

La consommation accrue de fruits de mer est aujourd'hui soutenue par l'aquaculture, qui est souvent nourrie avec des aliments fabriqués à partir d'espèces sauvages et qui pollue la mer, par exemple avec des médicaments tels que des antibiotiques et des pesticides. On estime qu'entre 42 et 66 kg d'azote et 7 à 11 kg de phosphore sont rejetés dans l'environnement pour chaque tonne de poisson produite par l'aquaculture. ⁵

La pêche est un exemple de réussite du modèle économique basé sur l'appropriation gratuite des biens communs et l'externalisation des dommages environnementaux. L'exploitation d'un bien commun enrichit des personnes privées et crée une dette environnementale impayable pour les générations futures. Il s'agit d'un modèle économique exemplaire d'"injustice écologique".

Les causes d'extinction ou d'altération des chances de survie de nombreuses espèces marines ne sont pas seulement liées à la pollution chimique et à la pêche. L'attention est attirée sur un autre aspect particulier : la pollution sonore des océans. De nombreux cétacés sont probablement gravement endommagés par les explosions marines, le bruit des forages et d'autres activités humaines sous-marines, notamment les moteurs de bateaux. ¹⁴ Dans les mers du Nord, des centaines de plates-formes flottantes génèrent un bruit qui est fatal à certains

cétacés. Les dommages générés par la pollution sonore expliquent certains échouages de cétacés : par exemple, les odontocètes s'orientent par écholocation, ce qui devient impossible lorsqu'ils sont immergés dans un bombardement d'ondes similaires à celles utilisées naturellement mais produites par l'homme (par exemple, les sonars des navires, les explosions et les forages).

L'UTILISATION NON RENOUVELABLE DES RESSOURCES EN EAU

Les eaux de surface et les eaux souterraines sont des ressources naturelles renouvelables à condition qu'elles soient utilisées de manière durable :

- 1) Les prélèvements, mis en œuvre à des fins différentes, telles que l'approvisionnement en eau potable, industrielle et agricole, ne doivent pas dépasser la capacité de régénération naturelle de la ressource ;
- 2) L'eau ne doit pas être contaminée, en particulier lorsqu'elle est utilisée pour l'alimentation humaine et animale.

Malheureusement, l'eau est toujours rendue à l'environnement plus polluée qu'elle ne l'était au moment de son utilisation, ce qui entraîne une détérioration de sa qualité au fil du temps.

La demande de consommation d'eau sur la planète est appelée à augmenter en raison de la croissance démographique et de l'accroissement de la production de biens et d'aliments. La disponibilité de l'eau (non salée et non polluée) devrait diminuer, et le nombre de pays confrontés à une pénurie d'eau augmente. Le changement climatique, la déforestation et la pollution sont parmi les principales causes de la réduction de la disponibilité de l'eau.¹¹⁴ Le nombre de personnes sur la planète qui devront vivre dans des environnements où l'eau est rare est appelé à augmenter : trois milliards d'ici 2035.

Chaque Américain consomme environ 400 litres d'eau par jour pour cuisiner, se laver et autres usages personnels. Si l'on ajoute l'eau utilisée pour irriguer les aliments qu'ils consomment, chaque Américain a besoin d'au moins 5.700 litres d'eau par jour.⁴²⁵ La FAO estime que les besoins en eau pour produire les aliments consommés quotidiennement se situent, selon les pays, entre 2.000 et 5.000 litres. On peut considérer qu'en général, un régime végétarien utilise entre 1.500 et 2.600 L par jour, mais pour un régime riche en dérivés animaux, c'est plus de 4.000 L par jour.⁸⁸⁰

La consommation moyenne d'eau domestique (pour la boisson, la cuisine et le lavage) en Italie est de 152 m³/habitant/an.⁸⁸⁰ En Italie, les prélèvements d'eau potable représentent environ 9 km³ par an, dont 85,6% proviennent des eaux souterraines et 14,3% des eaux de surface. Lors de la distribution de l'eau potable, entre 33% et 55% de l'eau prélevée est perdue.

Il faut au moins un litre d'eau pour produire une calorie à partir d'aliments d'origine végétale, mais il faut au moins dix litres pour produire une calorie à partir d'aliments d'origine animale.⁸⁸² Pour donner quelques exemples, la production d'un litre de lait nécessite environ 990 L d'eau, appelée eau virtuelle, il faut 18.900 L pour un kilo de café, 15.400 L pour un kilo de steak, 11.000 L pour un kilo de textile en coton, 3.300 L pour un kilo d'œufs, 3.100 L pour un kilo de fromage, 2.500 L pour un kilo de riz, 1.800 L pour un kilo de pâtes.⁹⁷⁹

Dans le secteur agricole, la consommation d'eau a plus que triplé en 50 ans : au moins 70% de toute l'eau non salée utilisée l'est dans l'agriculture.

Le problème de la pénurie d'eau est sous-estimé par les estimations des augmentations potentielles des énergies renouvelables et de la production alimentaire. La demande future de nourriture et de production d'énergie à partir de la biomasse est appelée à augmenter, de sorte que la consommation d'eau augmentera plus rapidement que la croissance démographique. Par exemple, le commerce de la seule eau virtuelle (l'eau "invisible" utilisée pour produire des aliments et d'autres biens) entre les différents États de la planète, du fait des exportations, a

doublé en seulement 23 ans. ⁸⁸⁰ Même en Italie, l'importation d'eau virtuelle dépasse celle consommée par la production nationale.

Il est probable qu'en 2050, l'agriculture italienne disposera d'au moins 19% d'eau en moins qu'aujourd'hui en raison de divers facteurs (baisse des précipitations, augmentation de l'évaporation). Selon ces prévisions, la production céréalière en Italie pourrait être si durement touchée que les pénuries d'eau pourraient être réduites d'au moins 17%. ⁸⁸⁰

D'autres exemples peuvent être donnés pour attirer l'attention sur la gravité de la situation. Tous les bovins et les chevaux élevés dans le Piémont nécessitent, rien que pour boire, une consommation d'eau potable égale à celle plus que suffisante pour au moins 80.000.000 de personnes par an : soit 20 fois la population actuelle du Piémont. L'eau utilisée pour abreuver les animaux et, en général, celle utilisée pour le bétail est restituée à l'environnement, mais avec divers contaminants : chimiques et biologiques. On ne peut espérer que l'effet de dilution soit suffisant pour protéger notre santé pendant une période indéfinie.

L'empreinte de l'humanité sur l'eau a dépassé sa capacité de renouvellement naturel : nous prenons trop d'eau, ce qui réduit les réserves précieuses telles que les eaux souterraines. Selon certaines estimations, l'homme prélève de l'eau dans les nappes phréatiques à un rythme au moins 3 à 4 fois supérieur à la capacité naturelle de régénération. ⁹⁸⁵ En conséquence, l'eau la plus propre et la plus précieuse s'épuise à jamais. Il convient d'accorder une plus grande attention à ces questions et d'encourager toutes les stratégies visant à réduire la contamination, les déchets, les fuites ou les utilisations abusives.

En général, dans le Piémont, les coûts pour les services d'approvisionnement en eau et de gestion des eaux usées sont très bas, par conséquent les stratégies de réduction et d'économie des déchets (par exemple : le recyclage des eaux usées) ne sont pas encouragées. Il n'existe aucune incitation à réduire le gaspillage de l'eau potable et à récupérer d'autres types d'eau (par exemple, l'eau de pluie pour l'irrigation). Un autre aspect à remarquer est que l'utilisation agricole de l'eau potable est plus de 4 fois moins chère que l'utilisation domestique, et que l'utilisation par le bétail est plus de 3 fois moins chère que l'utilisation agricole. ³⁶ Une plus grande attention pourrait être accordée aux politiques et stratégies visant à limiter le gaspillage et l'utilisation abusive, notamment par une meilleure modulation du tarif à payer pour recevoir de l'eau potable et évacuer les eaux usées. Des réductions pourraient être envisagées pour ceux qui investissent dans l'épargne et le recyclage, et des augmentations pour les utilisations moins importantes. Il convient de rappeler que la législation européenne (directive 2000/60, premier " considérant ") stipule :

"L'eau n'est pas un produit commercial comme un autre, mais un bien qui doit être protégé, défendu et traité comme tel. "

Le principe économique de recouvrement des coûts des services de l'eau devrait également prendre en compte les dommages et les répercussions négatives générés sur l'environnement et sur l'eau elle-même en raison d'une mauvaise gestion et d'une utilisation non durable. Les tarifs pourraient être augmentés pour les utilisations productives, qui génèrent des revenus et, en même temps, restituent l'eau très polluée. Les principes suivants peuvent être proposés pour une modulation plus équitable des tarifs : ³⁶

- pour les utilisateurs non domestiques : ceux qui consomment plus, paient plus ; c'est-à-dire qu'il devrait y avoir des barèmes basés sur le volume annuel utilisé, comme c'est le cas pour les utilisateurs domestiques ;
- ceux qui consomment pour un usage non primaire paient plus par unité de volume ;
- celui qui pollue le plus, paie proportionnellement plus ;
- ceux qui gaspillent, paient plus ;

- ceux qui économisent de l'argent et adoptent des stratégies pour améliorer la durabilité de l'utilisation de l'eau paient moins.

Une meilleure modulation du tarif pourrait inciter à des stratégies d'économie et de protection des ressources en eau.

PLANTES GÉNÉTIQUEMENT MODIFIÉES : LA SERVITUDE PROGRAMMÉE

LES PLANTES GÉNÉTIQUEMENT MODIFIÉES

Les cultures génétiquement modifiées et surtout leurs dérivés ont désormais envahi le monde. Les modifications génétiques touchent principalement quelques cultures telles que le maïs, le soja, le colza, le coton et ont deux applications : la résistance aux herbicides et la production autonome d'insecticides ; au moins 10% de toutes les terres cultivées sont utilisées pour produire des plantes génétiquement modifiées utilisées à des fins diverses, telles que l'alimentation animale et humaine. ¹⁵⁹

En 2018, 48% de la surface totale cultivée dans le monde en maïs, colza, soja et coton était occupée par des plantes génétiquement modifiées. ¹²⁴¹ Parmi les autres cultures génétiquement modifiées figurent la canne à sucre, la papaye (résistante aux virus), les pommes (pas de brunissement) et les pommes de terre (teneur en asparagine plus faible). Parmi les modifications génétiques les plus cultivées sur la planète figurent : ¹²⁴¹

- Résistance aux herbicides tels que le glyphosate, le glufosinate et, depuis 2016, au 2,4 D et au dicamba.
- Résistance à certains insectes par la production de toxines bactériennes (Bt).

En 2001 déjà, plus de 50 millions d'hectares étaient occupés par des plantes génétiquement modifiées : quatre fois la superficie agricole totale de l'Italie. ^{147, 155} Aux États-Unis, 70% des aliments transformés contiennent au moins un ingrédient dérivé d'organismes génétiquement modifiés (OGM).⁸

Au moins 50 cultures génétiquement modifiées différentes sont cultivées et commercialisées dans des pays comme les États-Unis et le Canada, mais en 2010, seules cinq espèces étaient autorisées en Europe : trois maïs et deux colzas. Au moins deux types de plantes génétiquement modifiées ont été autorisés à être cultivés en Europe : le maïs et les pommes de terre. En général, de nombreuses restrictions ont été imposées en Europe, puisque 19 pays au moins ont choisi de les interdire ou de les restreindre. Ces restrictions n'ont pas permis d'empêcher l'invasion sur nos tables d'aliments contenant des organismes génétiquement modifiés ou leurs dérivés. Par exemple, des traces génétiques de modifications générées en laboratoire ont été trouvées dans toutes les patates douces destinées à la consommation humaine. ¹⁰⁷⁶

Les aliments contenant des ingrédients dérivés d'organismes génétiquement modifiés qui peuvent être commercialisés aux États-Unis sont les suivants : maïs (au moins 92% des cultures de maïs cultivées aux États-Unis sont des OGM), soja (94% des cultures cultivées aux États-Unis sont des OGM), coton (94% des cultures cultivées aux États-Unis sont des OGM) ; (94% des cultures aux États-Unis sont des OGM, la composition de l'huile étant modifiée), patates douces, colza, pommes, papayes, canne à sucre, courgettes, courges jaunes, pastèques (sans pépins), bière, thé, bananes, myrtilles, cacahuètes, noix, fromage (au moins 80% sont fabriqués à l'aide d'enzymes produites par des bactéries génétiquement modifiées). ^{1077, 1078, 1079, 1080} Plus de 75% des produits transformés distribués dans les supermarchés nord-américains contiennent au moins un ingrédient dérivé d'organismes génétiquement modifiés. ^{1077, 1078} La situation en Europe n'est sûrement pas très différente : comment est-il possible que plus de deux tiers des aliments vendus en Amérique contiennent des dérivés d'OGM ou sont OGM et qu'en Europe, il n'y en ait aucun ? Deux tiers des protéines des aliments pour animaux utilisés en Europe proviennent du soja, dont 70% sont importés : au moins 90% sont des plantes transgéniques. ¹⁰⁸¹

En Europe également, les produits fermentés tels que ceux de l'industrie laitière nécessitent l'utilisation de micro-organismes génétiquement modifiés.

Les caractéristiques artificielles conférées aux plantes génétiquement modifiées comprennent :
127

- résistance aux herbicides (maïs, tabac, soja, colza) ;
- des fleurs avec un mâle stérile (colza, chicorée) ;
- résistance aux insectes (coton et maïs produisant des spores générées dans la nature par des micro-organismes tels que *Bacillus thuringiensis*) ;
- modification des couleurs des fleurs (œillets) ;
- prolonger la durée de conservation (œillets) ;
- structure modifiée de l'amidon (pomme de terre) ;
- retard de maturation (tomate).

On ne sait pas encore quelles conséquences cela aura sur la biodiversité et sur la propagation dans la nature de caractères créés artificiellement. Les organismes génétiquement modifiés peuvent affecter la biodiversité par la propagation de cultures résistantes aux herbicides, qui peuvent devenir des parasites pour d'autres cultures.¹⁵⁹ Ainsi, certains effets négatifs sont déjà enregistrés :

- la propagation spontanée de plantes génétiquement modifiées résistantes aux herbicides qui deviennent des parasites de diverses cultures ;
- l'utilisation accrue de certains herbicides (ceux pour lesquels les cultures OGM ont été rendues résistantes, comme le glyphosate) ;
- l'émergence d'insectes et de plantes résistants (par exemple, des insectes résistant à des toxines dérivées de bactéries du sol mais produites par des plantes transgéniques).

La plupart des plantes génétiquement modifiées sont cultivées dans cinq pays : les États-Unis, le Brésil, l'Argentine, le Canada et l'Inde. En 2011, au moins 159 millions d'hectares étaient cultivés avec des plantes génétiquement modifiées dans le monde, soit environ 3% de la surface cultivée de la planète.⁵⁵⁷

En 2013 déjà, la plupart du soja et du maïs cultivés aux États-Unis étaient génétiquement modifiés et plus de 282 millions d'hectares dans le monde étaient cultivés avec des plantes génétiquement modifiées.¹⁷⁵ Comme mesure de référence, il est utile de rappeler qu'en 2016, les exploitations agricoles européennes occupaient 173 millions d'hectares et les exploitations italiennes 11-12 millions d'hectares.⁸³⁹ Dans certains cas, 100% ou presque des cultures d'un pays sont génétiquement modifiées, comme le coton en Inde, le soja en Argentine et le maïs aux États-Unis.

Au Brésil (Mato Grosso), au moins sept millions d'hectares sont cultivés avec du soja, dont 90% est génétiquement modifié (par exemple, résistant à des herbicides comme le glyphosate).⁴⁵² En 1950, le soja était cultivé sur 17 millions d'hectares, alors qu'aujourd'hui il occupe plus de 250 millions d'hectares (14 fois plus). Le soja est utilisé à diverses fins, notamment pour nourrir plus de 700 millions de porcs en Chine. Dans le monde, au moins 70 milliards d'animaux sont tués chaque année pour la consommation humaine (sans compter les poissons).⁴⁵² Le système d'approvisionnement alimentaire est extractif car il n'est pas renouvelable et a donc un horizon temporel très court. Les entreprises de biotechnologie ont créé des plantes résistantes aux pesticides ou produisant des toxines par modification génétique. Ce système est à forte intensité de main-d'œuvre et utilise des machines, des produits chimiques et beaucoup plus d'énergie qu'il n'en produit en termes de calories alimentaires.^{36, 159} En outre, la plupart des terres cultivées sont gérées par une minorité d'agriculteurs qui sont devenus des propriétaires terriens. Le résultat est une réduction drastique de la biodiversité : les paysages sont tous les mêmes, ce sont soit des déserts, soit des monocultures (en mono-succession) à différentes périodes de l'année ; ce sont des déserts artificiels.

Les effets à long terme des plantes génétiquement modifiées sur l'environnement et les humains sont largement inconnus. Cependant, certains effets indésirables peuvent également être observés dans le monde des pollinisateurs. Certaines d'entre elles étaient facilement prévisibles, comme la réduction du nombre de plantes sauvages et donc de fleurs, en raison de l'utilisation accrue d'herbicides auxquels certaines plantes sont artificiellement résistantes. La capacité de résister à la toxicité des herbicides (par exemple le glyphosate) est l'une des modifications génétiques les plus cultivées dans le monde et touche de nombreuses cultures. Grâce à cet artifice, les plantes résistent à de fortes concentrations de molécules dangereuses afin de pouvoir en utiliser de plus grandes quantités. Les effets indésirables prévisibles comprennent l'émergence de plantes résistantes aux herbicides.⁵⁵⁷ Le risque d'une spirale désastreuse pour l'environnement et notre santé existe : le nombre de plantes résistantes qui deviennent des mauvaises herbes augmente et, par conséquent, on utilisera davantage d'herbicides car les cultures les tolèrent. D'autres alternatives devraient probablement être proposées, telles que la fauche mécanique, la rotation, la diversification des cultures, le travail du sol tout au long de l'année afin qu'il ne reste pas exempt de plantes, par exemple en automne ou en hiver.

Les cultures génétiquement modifiées ont été présentées comme une option pour réduire l'utilisation des pesticides et augmenter les rendements. Cependant, certaines des cultures génétiquement modifiées les plus répandues dans le monde, comme le maïs, le soja et le coton, ont vu l'utilisation de pesticides (par exemple, des herbicides) augmenter et les rendements n'ont pas augmenté de manière significative.

La diffusion de plantes génétiquement modifiées dans des endroits où l'agriculture est la principale ressource de survie est également un échec économique (par exemple, dans les pays en développement).⁵⁵⁷ Des études montrent que la diffusion de plantes génétiquement modifiées résistantes aux herbicides n'est pas économiquement viable, même dans les pays développés, et qu'elle n'a pas permis d'augmenter les rendements : par exemple, le coton dans le sud des États-Unis.⁵⁵⁷

Grâce à ces nouvelles technologies, la partie la plus intime et la plus importante des caractéristiques des êtres vivants peut être modifiée. À côté des gènes qui régulent les caractéristiques souhaitées par les entrepreneurs, comme la capacité des plantes à ne pas être tuées par les herbicides ou à produire des poisons pour insectes (toxines protéiques produites à l'origine par des bactéries vivant dans le sol comme le *Bacillus thuringiensis*), d'autres altérations sont générées. Par exemple, on transfère des gènes qui, en plus de ne pas appartenir à la plante, peuvent conférer une résistance aux antibiotiques ou être des promoteurs de l'expression de caractéristiques qui sont des gènes d'origine virale. Des modifications sont générées dont les effets sur le génome et la biodiversité sont largement inconnus et dont le danger est prévisible.

Un autre effet négatif a été enregistré dans le cas de la culture de plantes qui produisent des protéines bactériennes à action insecticide. Le *Bacillus thuringiensis* (Bt) est une bactérie sporigène qui vit naturellement dans le sol et peut produire des toxines protéiques. Lorsque les endotoxines produites par ces micro-organismes sont ingérées par certains insectes, elles endommagent leur tube digestif, comme c'est le cas pour les larves de diptères, comme les moustiques, ou provoquent une maladie paralytique chez les chenilles de nombreux lépidoptères (papillons). Des effets néfastes sur la santé des insectes pollinisateurs sont enregistrés depuis un certain temps : les plantes de soja génétiquement modifiées nuisent aux bourdons en raison de la présence d'une protéine (inhibitrice de protéase).³⁶¹ L'utilisation intensive d'herbicides appauvrit également la biodiversité et réduit les fleurs disponibles pour les pollinisateurs.

Ces toxines sont utilisées dans la formulation d'insecticides pour l'agriculture biologique et industrielle, mais aussi dans la création de plantes transgéniques (comme le maïs) qui peuvent produire elles-mêmes la toxine. Les toxines de la bactérie *Bacillus thuringiensis* sont également

utilisées en apiculture, dans la lutte biologique contre le papillon de la cire d'abeille.²⁰⁴ Un autre aspect négatif est que les insectes sont devenus résistants aux toxines produites par ces plantes génétiquement modifiées comme le maïs.⁴⁵¹ Le développement de la résistance a été accéléré par les monocultures qui ont lieu chaque année dans les mêmes champs (monoculture).

L'utilisation de plants de coton génétiquement modifiés, qui produisent des toxines bactériennes (protéines) à action insecticide (Bt), a entraîné une diminution des papillons pollinisateurs.¹⁹⁶ En outre, dans le cas du coton génétiquement modifié cultivé en Inde, des insectes cibles (ravageurs du cotonnier tels que *Pectinophora* : la teigne du coton ou le ver rouge du coton) résistants aux toxines ont été enregistrés. Un autre dommage énorme est causé par le fait que les semences de coton génétiquement modifié doivent être achetées chaque année par les agriculteurs indiens et coûtent jusqu'à huit mille fois plus cher que les semences de coton conventionnelles, qui entre-temps, en raison du monopole, ont pratiquement disparu du marché.

²⁰⁵ Rien qu'en Inde, il est intéressant de rappeler qu'il existe encore des chasseurs de miel produit par des abeilles sauvages et que, malheureusement, le travail agricole du pollinisateur manuel a dû être créé en raison de l'absence des insectes nécessaires (les ouvriers qui badigeonnent le pollen sur les fleurs dans les vergers).¹⁹⁶ Pour pouvoir effectuer une pollinisation manuelle, par exemple dans les vergers de pommiers en Chine, il faut d'abord obtenir du pollen, puis le collecter, le stocker, le commercialiser et le déplacer pour la pollinisation vers les endroits où il est nécessaire.²⁰⁸ Il s'agit de coûts énormes et insoutenables : il vaut mieux remplacer les cultures par d'autres qui n'ont pas besoin de pollinisateurs. Dans d'autres cultures également, comme les tomates en Australie, au lieu d'utiliser des bourdons, la pollinisation se fait à la main à l'aide de bâtons spéciaux : l'importation de bourdons est interdite sur ce continent (il s'agit d'une espèce étrangère).⁶⁸⁸

En conclusion, la biotechnologie a permis de concentrer la souveraineté alimentaire dans quelques entreprises privées. D'eux dépend la sécurité alimentaire de la plupart des habitants de la planète et, en particulier, des plus riches. Les règles économiques n'ont pas tenu compte des lois biologiques et écologiques, et programment les profits pour une durée très limitée. Cette habitude est insoutenable et dramatique car elle favorise l'extension de la pauvreté et repose sur un modèle agrochimique fragile, car il ne tient pas compte des limites planétaires.

INSTALLATIONS D'OBSOLESCENCE PLANIFIÉE

L'innovation technologique produite par la recherche en biotechnologie permet de générer des monstres biologiques qui ne pourraient pas exister dans la nature car ils s'éteindraient. Les gènes modifiés en laboratoire pour générer des plantes aux graines stériles sont appelés *terminateurs*. La biotechnologie permet de générer des plantes stériles, ou même des plantes qui peuvent nécessiter une application chimique pour stimuler la fertilité chaque année : le cultivateur doit payer les produits chimiques et reproduire les plantes lui-même. Les plantes peuvent être conçues avec la stérilité comme condition normale, mais la stérilité peut être convertie en fertilité par l'application d'un stimulus externe qui restaure la viabilité de la plante. Pour ressusciter la graine (on les appelle les gènes *zombies*), l'agriculteur ou le cultivateur doit utiliser un stimulus externe (comme des produits chimiques brevetés) pour rétablir la fertilité de la graine. Il s'agit d'un nouveau type d'obsolescence programmée appelé *stérilité transgénique réversible*. On voit immédiatement le pouvoir économique d'une telle technologie, qui offre la possibilité très dangereuse d'un contrôle et d'un monopole par des entrepreneurs. La communauté devrait avoir la possibilité d'empêcher la science de devenir une arme aussi dangereuse. Une telle technologie permet d'empêcher les agriculteurs de tricher : il s'agit d'une sorte de protection contre la copie. Autre aspect inquiétant : les agriculteurs qui

achètent des semences génétiquement modifiées, qui produisent des graines fertiles, doivent signer un contrat les engageant à les racheter chaque année (même si elles sont fertiles).

Une complication difficile à contrôler pourrait être la suivante : si un champ est contaminé par du pollen contenant le gène *terminateur*, les plantes qui en résultent auront des graines stériles, de sorte que le cycle de reproduction se termine dans d'autres champs. Si la contamination se fait par le gène *zombie*, les plantes qui en résultent auront besoin d'un produit chimique pour rendre à nouveau fertiles les plantes autrement infertiles. Ce produit chimique est couvert par un brevet et devra donc être acheté : même si un agriculteur n'achète pas de semences génétiquement modifiées, il risque de voir sa récolte contaminée par les cultures voisines. Cette condition de monopole qui détruit la biodiversité et subvertit les règles de la nature devrait nous horrifier et, par conséquent, nous inciter à agir en conséquence. Les principes de l'obsolescence planifiée, contrôlée par quelques entrepreneurs, ont été appliqués à la nourriture et à la nature. Du point de vue des entrepreneurs, cette technologie est un véritable chef-d'œuvre, permettant un contrôle complet et continu de la production alimentaire et pas seulement, comme c'est le cas pour le coton. Ce type d'application biotechnologique est l'une des plus hautes expressions de la capacité de l'ingéniosité humaine à détruire la biodiversité et les connaissances locales des agriculteurs. C'est une nouvelle expression de l'oppression, de la domination et de la colonisation. Il s'agit également d'une nouvelle forme de guerre dans laquelle ceux qui sont submergés mourront pauvres et affamés. Nous permettons, avec une apparente indifférence, que la capacité de l'humanité à se nourrir soit monopolisée et contrôlée par quelques entreprises privées dans le monde entier. C'est un plan parfait mais diabolique pour contrôler la capacité des êtres humains à subsister et donc à survivre. En bref, ce plan consiste à acheter des semences chaque année, pour toujours : blé, maïs, soja, coton, pour n'en citer que quelques-unes. Les réglementations relatives à la protection des brevets devraient être démantelées, car elles permettent à quelques entrepreneurs de contrôler la nourriture et donc les personnes, et autorisent la dévastation des équilibres naturels. Aujourd'hui encore, heureusement, plus d'un milliard de personnes dépendent des semences stockées comme principale source d'alimentation : elles n'ont pas encore été colonisées et, en même temps, elles sont résilientes dans l'un des aspects les plus importants lors des urgences et des crises, celui de l'autosuffisance alimentaire.

UN PROJET EXEMPLAIRE D'ESCLAVAGE PLANIFIÉ : LE MAÏS HYBRIDE

Les semences présentant des caractéristiques d'infertilité ont été commercialisées dans les années 1990, mais les technologies visant à empêcher les agriculteurs d'utiliser ces semences sont appliquées par les entreprises semencières depuis au moins 70 ans. Au fil des décennies, des entrepreneurs impitoyables ont investi massivement dans le développement de semences hybrides, notamment pour le maïs. Les semences hybrides doivent être rachetées chaque année car les générations successives perdent progressivement leurs caractéristiques originales. Nous pourrions dire qu'ils sont automatiquement protégés contre la copie et qu'ils font partie du programme plus large d'*obsolescence planifiée*. Il n'est pas intéressant pour l'agriculteur de conserver les graines et de les réensemencer, car sa récolte serait de moindre qualité, et il doit donc en acheter chaque année. Dans ce cas, l'obsolescence planifiée génère un esclavage planifié.

L'introduction des hybrides dans l'agriculture remonte à la première moitié du siècle dernier et a permis aux semenciers de réaliser d'énormes bénéfices. De nombreuses variétés commerciales de cultures majeures telles que le blé, le soja ou le coton ne sont pas des hybrides et sont pollinisées par le vent. Une histoire significative de cette nouvelle forme de colonisation et d'assujettissement a été enregistrée en Italie depuis la fin de la seconde guerre mondiale et

concerne les hybrides de maïs. Il faut se rappeler que le maïs s'est implanté en Italie vers 1530, importé du Nouveau Monde.⁷³⁷ De chaque quintal de graines, on pouvait espérer obtenir plus de quatre quintaux ; une partie était utilisée et une autre était conservée pour être semée l'année suivante : les graines des meilleures plantes. De cette façon, on a pu sélectionner les plantes ayant les caractéristiques les plus adaptées à chaque environnement particulier et garantir l'autosuffisance et la souveraineté alimentaire des territoires. Immédiatement après la Seconde Guerre mondiale, les États-Unis ont contribué à la reconstruction de l'Europe, ce qui a également influencé le secteur agricole. De la simple aide alimentaire, quelques mois après la guerre, l'aide à la reconstruction visait officiellement à modifier les techniques agricoles. C'était une période de crise où la faim et le chômage étaient répandus dans toute l'Europe. L'aide des États-Unis était donc nécessaire dans une Europe d'après-guerre en proie à la faim. Parmi les actions qui ont été entreprises, on peut citer :

- les plans d'aide économique et alimentaire des États-Unis (par exemple, le plan Marshall) ;
- la facilitation des importations des États-Unis en Europe (par exemple, réduction des droits sur les machines agricoles).

Parmi les activités visant à soutenir l'élevage italien, il y avait l'importation de maïs. Au début des années 1990, le marché mondial du maïs était dominé par les États-Unis (au moins 80%). En 1949, les semences hybrides importées étaient couvertes par des brevets et coûtaient plus de deux fois plus cher que celles déjà sur le marché. Il y a plus de 70 ans, la colonisation par l'industrie américaine avait commencé par le monopole de la capacité à produire des denrées alimentaires et des aliments pour animaux à base de maïs.⁷¹¹ Diverses stratégies ont été utilisées pour faciliter l'entrée des semences hybrides sur le marché, en remplacement des semences fertiles présentes depuis cinq siècles. Un financement public a été accordé pour réduire le prix auquel les agriculteurs pouvaient acheter des semences hybrides. Dans cette première phase, le prix a été rendu artificiellement similaire à celui des graines fertiles sur le marché, grâce à l'intervention financière des ressources publiques. Des stations d'expérimentation agronomique ont également été financées, dans le but de tester de nouvelles variétés et de démontrer les avantages potentiels de ces cultures brevetées. La stratégie, déjà en 1950, était très claire : convaincre les agriculteurs d'utiliser les nouvelles plantes et d'abandonner celles qu'ils avaient semées jusqu'alors. En quelques années, les agriculteurs deviendraient complètement dépendants de l'industrie des semences, et c'est ce qui s'est passé.⁷¹¹ Quelques entrepreneurs américains, en très peu de temps, se sont assurés la majeure partie du marché des semences de maïs. Afin de faciliter la conversion d'une agriculture autosuffisante en matière de production de semences à une agriculture totalement soumise, différentes sphères sociales ont été impliquées. En Italie, à cette époque, la politique, les syndicats et les organisations religieuses étaient impliqués. Dans les années 1950, par le biais des paroisses et des consortiums agraires, des semences ont été distribuées gratuitement à plus de 25.000 petits agriculteurs vivant principalement dans la vallée du Pô. L'agriculture capitaliste et monopolisée a rapidement pris le dessus. L'antiaméricanisme et l'anticapitalisme d'après-guerre propagés par la gauche italienne n'ont pas réussi à contrecarrer ce changement.⁷¹¹ L'entreprise de colonisation et de privation de la souveraineté alimentaire territoriale a été scellée avec la bénédiction et la participation active de l'Église. Dans la première phase de la colonisation, certaines des semences hybrides étaient données en cadeau et d'autres étaient vendues à prix réduit parce qu'elles bénéficiaient d'un financement. Pour les experts de l'époque, il est apparu immédiatement qu'il y avait un déséquilibre entre le financement de la recherche publique nationale et les subventions destinées à encourager la vente de semences hybrides par des entreprises privées d'un autre continent. Les moyens artificiels de subvention ont encouragé la diffusion de semences inadaptées à la régénération par les agriculteurs. Les promoteurs de la diffusion de nouvelles semences étaient bien conscients que le problème serait rapidement résolu au fil du temps en raison de la moindre

capacité de germination des variétés locales. Les graines peuvent être stockées pendant quelques années, après quoi elles ne peuvent plus être utilisées pour générer de nouvelles graines.

Afin de promouvoir le maïs hybride, une véritable campagne publicitaire a été organisée dans la presse et par la diffusion de vidéos destinées à un public peu alphabétisé. Il faut également rappeler qu'en 1944, les troupes américaines ont introduit l'insecticide organochloré DDT (dichlorodiphényltrichloroéthane), qui a contribué à l'éradication de la malaria en tuant les moustiques qui la propagent.

Les semences hybrides ont permis, dans de nombreux cas, d'augmenter les rendements, mais même dans ce cas, certains défauts étaient évidents, comme le fait qu'elles étaient principalement destinées à la consommation animale plutôt qu'humaine (polenta), et qu'elles étaient plus exigeantes en termes de fertilisation chimique et de pesticides. Elles ont nécessité de nouvelles machines, telles que des semoirs, et ont eu besoin d'irrigation. Mais surtout, elles ont obligé les agriculteurs à soutenir un nouveau coût, celui de devoir acheter des semences chaque année. On espérait que l'augmentation des coûts de culture pourrait être compensée par des rendements plus élevés. Grâce à la diffusion de semences hybrides non réutilisables, la population a effectivement été contrainte de réduire la consommation humaine de maïs afin de favoriser son utilisation dans l'élevage. Au début des années 1950, d'autres facteurs d'insécurité alimentaire se sont ajoutés dans une période de crise grave. À l'époque, on connaissait déjà la valeur nutritionnelle inférieure des nouvelles graines hybrides, déterminée par des analyses biochimiques (par exemple, une teneur inférieure en protéines digestibles a été identifiée : environ 6,7% de moins).

Le danger de perdre les variétés locales qui pouvaient être produites de manière indépendante s'est concrétisé. Les variétés locales étaient différentes et mieux adaptées aux caractéristiques environnementales du territoire, mais le processus diabolique d'ingénierie sociale l'a emporté. L'uniformité du paysage résultant de la réduction de la biodiversité et de l'utilisation de technologies coûteuses (machines, engrais, pesticides, semences biotechnologiques et irrigation) s'est répandue principalement dans le nord de l'Italie, où était concentrée la majeure partie de la culture nationale du maïs en 1971. Les variétés locales avaient presque totalement disparu au cours de ces années : en 1981, le maïs hybridé couvrait environ 92% de la superficie nationale de culture du maïs (en France, il occupait déjà plus de 90% de la superficie de culture du maïs dans les années 1970).⁷¹¹

Un autre aspect négatif est la tendance générale à l'abandon de la rotation des cultures au profit de la monoculture. L'une des conséquences a été que, dans les années 1980, l'eau potable de la vallée du Pô a été contaminée par l'herbicide atrazine.

En Italie, en 2010, la plupart des agriculteurs italiens achètent toutes les semences de maïs, dont 99% sont des hybrides. Le maïs se retrouve dans l'alimentation animale ou sous forme d'huile, dans des dizaines de produits destinés à la consommation humaine : mayonnaise, snacks, desserts glacés, fruits au sirop, pilules vitaminées, etc. Les sirops sucrés dérivés du maïs peuvent être utilisés comme nourriture pour les abeilles domestiques, en remplacement du nectar des fleurs. Ainsi, le maïs est également cultivé pour répondre aux besoins des apiculteurs. Dans les années 2000, la culture du maïs est sur-subsventionnée pour générer un agrocarburant : le méthane. Le financement de la production de biogaz, également connu sous le nom d'agro-méthane, est un autre type de spéculation qui, de manière incroyable, n'a pas été entravée, générant un énorme gaspillage de ressources publiques.⁷⁴¹

D'autres conséquences de cette colonisation ont été le déclin de la recherche publique et la réduction de la capacité à contrer les intérêts privés. En Italie, la subordination technologique et la dépendance alimentaire vis-à-vis des entreprises étrangères ont augmenté en parallèle. Le miracle économique des années 70 a généré une augmentation du revenu par habitant, qui a permis de manger plus de viande et moins de polenta, et les Italiens en sont donc venus à consommer de plus grandes quantités de maïs, mais indirectement par le biais de l'alimentation

animale. L'accroissement de la richesse a permis de se déconnecter des précieux et délicats équilibres écologiques qui ont été volontairement compromis de manière irréversible. Cette indépendance temporaire à l'égard des règles biologiques était une illusion car, après des années d'aveuglement, les désastres écologiques résultant de choix à courte vue sont très évidents, même pour ceux qui n'ont aucun intérêt à les voir.

Le paquet technologique monopolisé du maïs comprend maintenant un nouveau bond en avant avec des plantes génétiquement modifiées, comme des plants de maïs résistants aux herbicides tels que le glyphosate. Dans ce cas, l'agriculteur est également obligé d'acheter certains pesticides soumis à une autre forme de monopole, celui du brevet. Cela a accru la dépendance à l'égard de quelques entreprises et augmenté les profits des vendeurs de cette biotechnologie brevetée. Nous avons abandonné la souveraineté alimentaire et dévasté les écosystèmes agricoles sans en prendre soin comme nous aurions dû le faire. La perte de la biodiversité et la disparition de la culture paysanne qui prône l'autosuffisance alimentaire sont des faux pas qui vont coûter cher.

En 2012, au moins cinq pays européens cultivaient du maïs génétiquement modifié : l'Espagne, le Portugal, la République tchèque, la Slovaquie et la Roumanie. Les autres pays, comme l'Italie, ont été autorisés à l'importer à des fins zootechniques (en Italie, des cultures GM interdites comme le maïs dans les provinces d'Udine et de Padoue ont été découvertes à plusieurs reprises).⁹⁸⁷ Cette histoire raconte l'échec de la possibilité de diffuser une agriculture moins polluante, plus éco-durable et autosuffisante.

Parmi les sonnettes d'alarme qui auraient dû nous réveiller depuis longtemps, on trouve :

- la réduction de la biodiversité, comme l'extinction des pollinisateurs et la mortalité accrue des abeilles domestiques ;
- la réduction de la fertilité des sols ;
- la pollution de l'eau ;
- l'apparition de super nuisibles (plantes et insectes résistants aux pesticides) ;
- l'utilisation exagérée d'énergie fossile par calorie produite (rapport de plus de 10 calories investies pour chaque calorie obtenue dans l'alimentation).

Ce sont là quelques-uns des paradoxes de l'agriculture moderne qui ne peuvent plus être ignorés. La condition devenue utopique, à savoir que les agriculteurs conservent leurs propres semences pour l'année suivante, est la seule qui soit durablement réalisable. La seule façon de socialiser les avantages de la biotechnologie est probablement d'encourager sérieusement la recherche publique. À l'heure actuelle, les connaissances biotechnologiques constituent souvent un oligopole de grandes entreprises dont l'objectif premier est le profit financier. Permettre que la souveraineté et la sécurité alimentaires soient monopolisées par des règles économiques artificielles n'est rien d'autre que de l'autodestruction.

Malheureusement, nous n'apprenons pas de nos erreurs et persévérons même en augmentant le niveau de pression négative sur des écosystèmes qui s'effondrent déjà. Les plantes génétiquement modifiées ainsi que l'utilisation de pesticides (par exemple, les néonicotinoïdes dans les semences de maïs ou les herbicides dans les cultures biotechnologiques rendues résistantes à ces molécules) nous permettent de retracer une histoire similaire à cette histoire passée mais actuelle. Au fil du temps, le pouvoir destructeur de la biotechnologie appliquée à l'agriculture a énormément augmenté.

DOMMAGES COLLATÉRAUX AFFECTANT LA COMMUNAUTÉ ET LES GÉNÉRATIONS FUTURES

La plupart des systèmes agricoles sont totalement dépendants des grandes entreprises, qui détiennent un monopole ou un oligopole sur la fourniture de semences et de pesticides. Dans de nombreux cas, les agriculteurs n'ont pas le choix entre, par exemple, les semences traditionnelles et les semences végétales génétiquement modifiées. L'innovation biotechnologique favorise la concentration du pouvoir sur la souveraineté alimentaire dans quelques grandes entreprises, ce qui rend le système fragile et non durable. Une conséquence négative est que certaines monocultures deviennent majoritairement engagées dans des cultures génétiquement modifiées telles que le maïs, le soja et le colza. Les effets indésirables générés par la culture généralisée d'organismes génétiquement modifiés sont notamment les suivants :

- Les coûts auxquels sont confrontés les agriculteurs ont augmenté.
- L'autonomie territoriale (quoi cultiver et comment cultiver) et la sécurité alimentaire ont diminué : les cultures alternatives à l'agriculture chimique ont quasiment disparu.
- L'influence des grandes entreprises sur les choix éthiques, environnementaux et sanitaires s'est accrue.
- Les cultures génétiquement modifiées peuvent propager les gènes parmi les espèces sauvages ou les variétés rustiques, ce qui entraîne un appauvrissement de la biodiversité, des problèmes écologiques et l'insécurité (pauvreté et faim). Les caractères génétiques qui confèrent une résistance aux herbicides ont déjà conduit à l'émergence de plantes ayant le potentiel de devenir des super-mauvaises herbes. Des plantes de colza, résultat d'une hybridation naturelle au Canada, ont été enregistrées comme étant résistantes à trois herbicides simultanément : glyphosate, glufosinate et imidazolinone.⁶⁹⁴
- Les plantes sauvages qui reçoivent du pollen de plantes génétiquement modifiées peuvent s'affaiblir.
- Le pollen et le nectar des plantes génétiquement modifiées servent de nourriture à de nombreux insectes, avec des effets en partie imprévisibles. Par le biais du pollen et du nectar, les modifications génétiques et les toxines peuvent être transmises à l'environnement et à la chaîne alimentaire.
- Les insectes deviennent résistants aux toxines produites par les plantes génétiquement modifiées : les chenilles des papillons se nourrissant de tissus végétaux deviennent résistantes aux toxines telles que celles du *Bacillus thuringiensis*. Au moins 500 espèces de parasites végétaux tolérants aux pesticides ont été recensées.
- Les toxines à action insecticide, et dans les tissus des plantes génétiquement modifiées, sont produites tout au long du cycle de la plante. Les ravageurs, tels que la pyrale du maïs, seront constamment exposés à la pression sélective des insecticides et deviendront plus facilement résistants. Afin de réduire la pression sélective, qui est contre-productive pour l'agriculture, une partie de la zone agricole adjacente pourrait être cultivée avec des plantes qui ne produisent pas ces toxines insecticides. Il faut toutefois utiliser des plantes qui ne peuvent pas recevoir le pollen de plantes génétiquement modifiées. En réalité, la production biologique pourrait subir de graves dommages économiques.
- Les toxines telles que celles du *Bacillus thuringiensis* restent actives dans le sol même après 234 jours.⁶⁹⁴ Ainsi, les invertébrés et les microbes du sol sont exposés à cette toxine. Un ver de terre (*Lumbricus terrestris*) exposé à cette toxine pendant 200 jours a montré des effets sublétaux tels qu'une réduction de poids. À partir des invertébrés du sol, la toxine pourrait remonter la chaîne alimentaire via les prédateurs.
- L'utilisation accrue d'herbicides dans les cultures de plantes génétiquement modifiées pour être résistantes à de fortes concentrations de certaines molécules provoque une

catastrophe écologique. Les effets secondaires inévitables comprennent la réduction des plantes sauvages, des pollinisateurs et des oiseaux. En outre, il existe des problèmes de santé causés par les résidus dans les aliments et l'eau. Les herbicides détruisent les herbes sauvages et réduisent la présence d'insectes qui s'attaquent aux ravageurs des cultures. Ainsi, la concurrence naturelle utile aux agriculteurs est diminuée. Les herbicides restent dans le sol, exposant les micro-organismes et les invertébrés à des effets potentiellement dangereux. La persistance dans l'environnement entraîne une contamination de la chaîne alimentaire, même chez les organismes sauvages. L'effet antibiotique du glyphosate (herbicide) sur les micro-organismes du sol qui sont importants pour la formation des mycorhizes et la fixation de l'azote est connu depuis longtemps.

- Une augmentation de l'homogénéité génétique de la zone cultivée, car les plantes génétiquement modifiées encouragent les systèmes de production intensive utilisant de grandes quantités d'énergie et de produits chimiques (engrais et pesticides). La résilience et la biodiversité sont réduites en raison de la simplification du système de production alimentaire.
- Certains insectes insectivores sont élevés pour la lutte biologique (par exemple *Chrysoperla carnea*). Des effets sublétaux ont été enregistrés lorsque ces insectes sont élevés en nourrissant des insectes herbivores, qui sont à leur tour nourris avec des plantes génétiquement modifiées capables de produire la toxine *Bacillus thuringiensis*. La toxine passe de la plante (maïs génétiquement modifié) à l'insecte herbivore (larve de pyrale du maïs) et de là à l'insecte prédateur (*Chrysoperla carnea*), augmentant la mortalité et provoquant un retard dans le cycle de vie.⁶⁹⁴ *Chrysoperla carnea* est élevée dans certaines biofermes en Amérique et en Europe pour être utilisée dans la lutte biologique, principalement dans les cultures protégées (serres), mais elle est également très commune dans la nature, dans les agrosystèmes où les pesticides sont peu utilisés. Contrairement aux autres Chrysopidae, qui sont souvent prédateurs, les adultes de *Chrysoperla carnea* se nourrissent de miellat, de nectar et de pollen. Les adultes peuvent parcourir des distances de plusieurs dizaines de kilomètres. Les larves sont des prédateurs zoophages et se nourrissent de petits arthropodes ou d'œufs. Leurs proies préférées sont les pucerons, mais ils peuvent également se nourrir d'acariens, de psylles, d'aleurodes, de cochenilles ou d'œufs d'acariens, de lépidoptères et de coléoptères.⁶²⁵

Les modifications génétiques les plus cultivées au monde, la résistance aux herbicides et la capacité à produire des toxines insecticides, génèrent des dommages environnementaux directs et indirects. L'utilisation d'herbicides augmente et les toxines entrent dans la chaîne alimentaire. Les effets à long terme de la diffusion des plantes génétiquement modifiées sur la biodiversité et la santé des sols sont largement inconnus mais, pour autant que nous le sachions, ils sont prévisiblement négatifs. Appliquer le principe de précaution dans ce cas serait un signe de prévoyance et d'amour pour les générations futures. Attendre que les preuves scientifiques soient nombreuses, indiscutables et acceptées par la majorité des acteurs concernés (hommes d'affaires, agriculteurs et politiques) est pour le moins risqué. En tout cas, de nombreux dangers ont été constatés et amplement documentés.

ÉNERGIES ISSUES DE LA BIOMASSE : AGROMÉTHANE OU BIOGAZ

PEU CONTRE BEAUCOUP

Le pétrole, le gaz et le charbon ont été créés dans des conditions géologiques spécifiques qui ne se reproduisent pas si facilement, surtout pas dans un délai compatible avec les taux d'extraction actuels. Pour toutes les ressources non renouvelables, il est clair qu'un pic est atteint, après quoi la production commence inexorablement à décliner. Par conséquent, nous devons nous préparer à ce changement afin qu'il ne soit pas brutal et donc catastrophique. Si nous essayons de brûler tous les combustibles fossiles disponibles, la planète deviendra certainement très inhospitalière et invivable avant qu'ils ne soient épuisés. Les stocks connus de réserves pétrolières, s'ils étaient extraits, pourraient entraîner une augmentation de la concentration de gaz altérant le climat (par exemple, le dioxyde de carbone) de plus du double du niveau actuel. Les énergies renouvelables, comme la biomasse (par exemple le bois de chauffage) ou l'énergie solaire, doivent également être adaptées à un système qui présente d'énormes limites. La biomasse soustrait des terres et des ressources à la production alimentaire, et les panneaux solaires nécessitent des matériaux qui sont disponibles en quantités finies, occupent également des terres agricoles et nécessitent du pétrole pour être construits. Des choix importants nous attendent donc, qui ne pourront être faits raisonnablement que si des aspects actuellement sous-estimés, tels que les aspects éthiques et environnementaux, sont également pris en compte.

En 2009 déjà, 3% des carburants utilisés pour le transport routier étaient des agrocarburants : agroéthanol (à partir de canne à sucre, de maïs et de blé) et agrodiesel (à partir d'huile de palme et de soja). En 2009, 54% de l'agroéthanol était produit aux États-Unis (à partir de maïs) et 35% au Brésil (à partir de canne à sucre). ³⁶ Aux États-Unis, au moins 10% du carburant liquide utilisé pour les voitures est de l'éthanol dérivé principalement du maïs. Sur la planète, en moins de 20 ans, la production d'agro-carburants a été multipliée par près de 10 (de 9 milliards de tep en 2000 à plus de 84 milliards de tep ou tonnes équivalent pétrole). ⁹⁷⁹

Le choix entre la production d'agrocarburants ou de denrées alimentaires correspond au fait de devoir choisir entre assurer un mode de vie basé sur le consumérisme pour quelques personnes riches ou éviter l'extrême pauvreté. N'oublions pas que dans des pays comme les États-Unis d'Amérique, environ 40% du maïs cultivé est transformé en carburant (éthanol) pour les voitures. ⁵ Si le maïs cultivé aux États-Unis pour produire de l'agroéthanol était destiné à la consommation humaine, des centaines de millions de personnes supplémentaires pourraient être nourries (au moins 330 millions selon certaines estimations). ⁹⁸⁵

En 2010, l'agriculture mondiale a produit l'équivalent de plus de 5.300 kcal par habitant, soit plus qu'assez pour nourrir l'ensemble de la population mondiale. Malheureusement, une grande partie de cette énergie est utilisée pour nourrir les animaux d'élevage ou gaspillée en agrocarburants, et au moins un tiers finit à la poubelle. Nous n'aurions pas besoin de produire plus de nourriture si nous étions prévoyants et altruistes. Cette folie de consommation entraîne un énorme gaspillage, comme l'utilisation de près d'un tiers des terres agricoles pour produire des légumes qui ne seront pas utilisés pour la consommation humaine.

Les agro-carburants dérivés du maïs, du blé et de la canne à sucre, utilisés pour produire de l'éthanol en remplacement du pétrole dans le transport routier, ne pourront pas remplacer les combustibles fossiles, ni constituer une alternative viable pour ne serait-ce qu'une fraction de la consommation d'énergie, à moins d'accepter qu'ils accroissent la fracture sociale et économique

au sein de la population et favorisent les effets négatifs sur l'environnement (par exemple, la pollution de l'eau et la dégradation des sols). En outre, l'extension du gaspillage des terres agricoles pour faire rouler des voitures aggravera le changement climatique.

L'histoire des agro-carburants en Italie représente effectivement l'incapacité de la communauté à se défendre contre elle-même et les intérêts égoïstes de quelques-uns.⁹⁵⁴ Cette histoire met en lumière la lutte de la minorité contre la multitude, où temporairement une minorité gagne, mais à la fin du jeu, tout le monde perd. Les pages suivantes retracent l'histoire d'un énorme gaspillage d'opportunités, de temps et de ressources économiques. Il s'agit d'une dilapidation disproportionnée qui a favorisé l'utilisation abusive et non rentable des terres. Cette triste histoire est racontée en détail dans une de mes publications qui a été récompensée, en 2017, par le Prix national de l'édition universitaire. Voici quelques informations extraites de ce livre : *Energie rinnovabili da biomasse : rischi e opportunità. Coltivazioni, allevamenti, compost, biogas e agro-carburanti: analisi degli impatti ambientali, delle ricadute sulla salute e della sostenibilità* (EPC, 2016).

Les incitations prévues pour la production d'électricité à partir de la fermentation anaérobie ont encouragé des comportements non durables, comme l'autorisation en 2011, dans la seule province de Crémone, de plus de 120 installations effectuant la fermentation anaérobie de grandes quantités de céréales pour produire du méthane.⁹⁵⁴ Il s'agit d'une zone à forte densité d'élevages et à disponibilité insuffisante de terres pour mettre en œuvre l'utilisation agronomique des produits digérés.

En Italie, en quelques années, grâce à des incitations publiques, plus de 1.100 installations produisant du méthane en utilisant principalement des céréales ont été construites. La conception n'était pas le résultat d'évaluations environnementales, mais était conditionnée par le mécanisme d'incitation. On réécrit une histoire, en la résumant, dans l'espoir qu'elle ne se répète pas, car il s'agit d'un écocide volontaire, dans la mesure où il a été planifié et soutenu par des administrateurs et des politiciens qui, en fait, étaient asservis à des intérêts privés et égoïstes.

LA PRODUCTION D'AGRO-MÉTHANE

L'une des technologies pouvant être utilisées pour produire de l'énergie électrique et thermique est la production de méthane, un combustible gazeux, par fermentation anaérobie à partir de biomasses telles que les effluents d'élevage, les sous-produits de l'industrie alimentaire (par exemple, les déchets issus de la transformation des légumes, comme les tomates), la fraction solide des déchets urbains et les boues provenant de l'épuration des eaux usées urbaines (eaux d'égout).⁹⁵¹ Depuis plus de 35 ans, les stations d'épuration des eaux usées et les décharges en Italie utilisent le méthane produit par la fermentation anaérobie à des fins énergétiques. La fermentation est effectuée par des micro-organismes que l'on trouve également dans le tube digestif d'animaux tels que les bovins et les porcins et qui produisent du méthane dans des conditions anaérobies, c'est-à-dire en l'absence d'oxygène (l'oxygène représente au moins 20% de l'air que nous respirons, l'azote 78% et le dioxyde de carbone 0,04%). C'est pourquoi la fermentation est également appelée digestion anaérobie.

La fermentation anaérobie est un processus biochimique basé sur la décomposition de substances organiques complexes, telles que les lipides, les protéines et les glucides, contenues dans les plantes et les matrices d'origine animale (par exemple, les fèces), effectuée par divers groupes microbiens.⁹⁵¹ Il est possible de considérer le fermenteur comme un récipient contenant un substrat liquide dans lequel sont élevés des micro-organismes qui, comme tous les êtres vivants, ont besoin de conditions optimales spécifiques pour vivre et se reproduire. L'avantage de ce type d'élevage est que, si certaines conditions sont réunies, les micro-organismes produisent du méthane et réduisent la quantité de matière organique, diminuant ainsi la charge

potentiellement polluante des matrices qu'ils fermentent. Cela est hautement souhaitable dans une décharge de déchets organiques ou une usine de traitement des eaux usées. Les installations fonctionnant dans des conditions mésophiles, c'est-à-dire entre 30°C et 40°C, sont les plus courantes en Italie et utilisent une partie de l'énergie produite pour chauffer les fermenteurs, qui seront isolés. Le processus de fermentation en phase liquide durera entre 15 et 50 jours.

Une installation de fermentation anaérobie est constituée d'une série de cuves de digestion et de stockage (cuves pour la fraction liquide du digestat), et d'une zone où sont stockées certaines matrices telles que l'ensilage (par exemple : stalles pour le maïs, pour le fumier, pour la fraction solide du digestat, cuves souterraines pour le lisier d'élevage). Dans le complexe, il y aura plusieurs réservoirs de différentes tailles et quelques pièces pour la gestion du processus (bureaux, cabine électrique, stockage, toilettes), pour le moteur qui brûle le méthane (co-générateur), pour le stockage des véhicules et des équipements. Il y aura également un réservoir pour le biogaz, qui pourra être situé au-dessus des réservoirs et également dans une zone dédiée. Le biogaz est collecté dans la partie supérieure des réservoirs, à travers un couvercle de dôme de gazomètre et éventuellement dans d'autres systèmes de stockage. Le dôme du gazomètre se présente sous la forme d'un demi-cylindre ou d'un dôme sphérique et peut être constitué de trois membranes superposées.

Théoriquement, toute matrice organique peut être utilisée pour nourrir les micro-organismes qui effectuent une fermentation anaérobie pour produire du méthane. Comme tous les êtres vivants, les différents micro-organismes aiment principalement certains nutriments, dans des concentrations et des proportions bien définies. En mélangeant de manière appropriée différentes matrices à l'entrée du fermenteur, on peut garantir la présence de nutriments dans les concentrations les plus appropriées. Pour la production d'agro-méthane (biogaz), il faut choisir des matrices qui peuvent être utilisées comme engrais : ce critère est très important.

La fermentation anaérobie produit du biogaz, qui contient du méthane en concentrations variables, ainsi que du dioxyde de carbone et d'autres gaz. La composition du biogaz est similaire à celle du gaz naturel. Le biogaz produit par la fermentation anaérobie est composé de :

- 50-65% de méthane (le pourcentage augmentera si l'on augmente certaines substances organiques dans les matières fermentées, comme les lipides) ;
- 35-45% de dioxyde de carbone ;
- 1-10% de vapeur d'eau (augmente avec la température) ;
- 0-5% d'azote ;
- 0-2% d'oxygène et autres gaz.

La combustion du méthane, qui est la fraction la plus abondante du biogaz, permet de produire de l'énergie électrique et thermique. La combustion a lieu à des températures supérieures à 850°C. Le biogaz a une densité de 1,2 kg/m³ et 1 m³ correspond à 0,6 L de pétrole ou 2,7 kg de bois. Le combustible (méthane) et le comburant (air) arrivent au brûleur, qui produit de la chaleur grâce à la flamme. La combustion du méthane produit également de la chaleur, qui représente plus de 50% de l'énergie que l'on peut obtenir.

Les installations de biogaz mettent en œuvre la cogénération si elles sont capables de produire à la fois de l'électricité et de la chaleur. Le problème majeur est que la chaleur ne peut être transportée ou stockée facilement, elle doit donc être utilisée dès qu'elle est produite et à proximité du site. Une usine travaillant dans des conditions mésophiles utilise entre 11 et 20% de l'énergie thermique produite pour maintenir les conditions mésophiles (en fonction des conditions climatiques).

Le biogaz, pour pouvoir être injecté dans le réseau de distribution de méthane (il est souvent appelé bio-méthane), doit avoir une composition réglementée. Les gaz non méthaniques peuvent être éliminés du biogaz à l'aide de procédés spéciaux permettant d'atteindre des concentrations de méthane supérieures à 90%. Ainsi, le biogaz obtenu par la fermentation des effluents d'élevage ou des décharges doit être purifié avant de devenir du bio-méthane, qui peut

être utilisé pour le transport ou le chauffage domestique. L'épuration étant un processus coûteux et donc peu rentable, cette voie n'est pas compétitive par rapport à la production d'électricité sur le lieu de production du biogaz et à son injection immédiate dans le réseau.

La production d'énergie par fermentation anaérobie peut être mise en œuvre pendant la période où le fumier est normalement stocké avant de pouvoir être utilisé comme engrais (généralement entre trois et six mois). Au lieu d'un stockage ouvert temporaire, comme c'est généralement le cas, le fumier pourrait être stocké dans des volumes fermés et isolés, avec récupération du biogaz produit.

Malheureusement, de nombreuses usines (la plupart des usines financées en Italie) ont mis en œuvre la co-digestion, ce qui signifie que des plantes spécialement cultivées comme le maïs, le sorgho et le triticale sont mélangées aux effluents d'élevage. Ainsi, les productions céréalières telles que le maïs, destinées principalement à l'alimentation animale et secondairement à la consommation humaine, sont nourries par des micro-organismes provenant du tube digestif des bovins ou des porcs et qui, vivant dans des conditions anoxiques, parviennent à produire du méthane.

Le produit digéré, c'est-à-dire la matière organique liquide résultant de la fermentation, peut être séparé mécaniquement en deux fractions, une solide et une liquide. La fraction liquide aura une teneur en solides plus faible (3-5% de matière sèche) et constituera la majeure partie du volume. Le produit final qui sort de l'installation de fermentation anaérobie est une matière organique qui peut être utilisée en agriculture comme engrais et qui, comme nous l'avons déjà mentionné, est appelée digestat. Dans le monde, le digestat résultant de la co-digestion anaérobie des effluents d'élevage est utilisé aux fins suivantes :

- Amélioration de la fertilité des sols (en respectant certains critères sanitaires et agronomiques). Le produit digéré sera riche en nutriments tels que l'azote, qui sera présent principalement sous la forme ammoniacale, facilement utilisable par les plantes, mais facilement dispersée dans l'eau et l'atmosphère.
- Séchage et combustion ultérieure pour la production d'énergie.
- Fermentation aérobie pour la production de compost (la fraction solide de la matière digérée est utilisée).
- Production de larves de mouche domestique (*Musca domestica*) destinées à l'alimentation (la conversion larve/digestat en poids peut atteindre 22%).⁸⁹²
- La croissance des algues est utilisée à diverses fins par l'industrie chimique ou pour la production d'aliments pour animaux et d'engrais.^{893, 894}
- Intégration de certains nutriments dans l'aquaculture. Cette application est exploitée dans les pays du tiers monde et en Chine.⁸⁹⁵

En Italie, l'utilisation dominante est agronomique, c'est-à-dire que les digestats sont utilisés comme des effluents d'élevage.

La production d'électricité à partir d'agrométhane, obtenu par la fermentation anaérobie d'effluents d'élevage et de céréales, a été classée comme une source d'énergie renouvelable, au même titre que l'énergie éolienne, solaire, géothermique et hydroélectrique.

Dans certains pays, comme l'Italie et l'Allemagne, la construction d'installations réalisant la fermentation anaérobie des céréales a été rentable grâce à l'utilisation de fonds publics par des particuliers qui, par conséquent, ont simplement pris le risque d'anticiper les coûts. Ces coûts ont été largement récupérés quelques années après le démarrage des centrales grâce à un financement public. La réglementation n'a pas suffisamment sélectionné les projets capables d'apporter les bénéfices attendus des énergies dites renouvelables. En Italie, la plupart des installations, qui produisent du méthane à partir de la fermentation anaérobie des effluents d'élevage et des cultures céréalières, sont situées dans le nord de l'Italie, principalement en Lombardie, en Vénétie, dans le Piémont et en Émilie-Romagne : les installations qui ont réussi à

obtenir un financement (tarif tout compris) avaient une puissance comprise entre 501 et 999 kWe, car les incitations favorisaient cette taille (décret législatif n° 387 du 29/12/2003).

LES AVANTAGES DE LA FERMENTATION ANAÉROBIE

L'intention déclarée, noble et partageable, était d'encourager la production d'énergie électrique et de chaleur en favorisant la réduction des émissions de dioxyde de carbone dans l'atmosphère. Par convention, il a été établi que 1 MW/h_e produit par la fermentation anaérobie de biomasses évite l'émission de 456 kg de dioxyde de carbone (CO₂) d'origine fossile (décret législatif 79/99) ; cette quantité de dioxyde de carbone est celle produite par une turbine à gaz avec un rendement de 55%, qui produit 1 MW/h d'électricité.

La fermentation anaérobie des effluents d'élevage présente à elle seule certains avantages :

- Elle produit de l'électricité et de la chaleur. En général, au moins 10 à 20% de toute l'énergie produite est nécessaire pour faire fonctionner l'installation dans des conditions mésophiles (températures adaptées à la vie des micro-organismes intestinaux). Le pourcentage d'énergie nécessaire pour maintenir constante la température des fermenteurs sera plus élevé en hiver et dans les zones climatiques plus froides. Une partie de l'énergie peut être utilisée à d'autres fins, comme la production d'électricité et de chaleur.
- Les émissions de gaz qui altèrent le climat, comme le méthane provenant du stockage du fumier (ou du traitement des eaux usées), sont réduites.⁹⁶¹
- Le produit obtenu en fin de fermentation, appelé produit digéré, contient moins de matière organique que le produit d'entrée. Par conséquent, le processus de production de biogaz entraîne une réduction de la matière organique présente dans les effluents d'élevage.
- Il ne réduit pas les quantités d'azote et de phosphore, de sorte que le digestat peut toujours être utilisé comme engrais. Le digestat peut être utilisé comme substitut aux engrais chimiques, comme les effluents d'élevage.
- Il transforme une partie de l'azote organique en azote ammoniacal, plus facilement assimilable par les plantes, mais qui a l'inconvénient d'être odorant et plus mobile dans l'environnement. L'ammoniac se concentre dans la fraction liquide du produit digéré. L'augmentation de l'ammoniac peut être un avantage ou un inconvénient, selon la façon dont le produit digéré est utilisé.

Il faut préciser que le processus de production de biogaz à partir d'effluents d'élevage ne résout pas à lui seul le problème de l'"élimination" : le produit de la production de biogaz, le digestat, a un volume supérieur à celui des matrices d'entrée, en raison de la dilution nécessaire avec de l'eau, notamment du fumier. Avec la co-digestion, les volumes à gérer pour le stockage et l'épandage augmenteront considérablement, car les installations de biogaz entreront dans des matrices dont la teneur en matière sèche est de 20% pour le fumier de bovins et de plus du double pour l'ensilage de maïs, et produiront un produit digéré de 6 à 10% de matière sèche. Par conséquent, les volumes à manipuler augmenteront avec les coûts de stockage et de transport qui en découlent.

Théoriquement, en Italie, en utilisant seulement une partie des déchets produits, il serait possible d'obtenir l'équivalent de plus de 1,5 million de tonnes d'équivalent pétrole. La productivité potentielle du biogaz pourrait être exploitée à partir des FORSU (fraction organique des déchets solides municipaux), des effluents des stations d'épuration des eaux usées et des déchets d'abattoirs.

On estime que les émissions de méthane (CH₄) provenant des secteurs des déchets (décharges) et du traitement des eaux usées représentent 18% de l'ensemble des émissions de méthane dues

aux activités humaines.⁹⁴⁰ Si l'on utilisait la totalité du méthane potentiellement disponible dans les décharges et les stations d'épuration des eaux usées en Europe, on obtiendrait un avantage majeur, notamment en réduisant l'utilisation des combustibles fossiles. En théorie, une quantité d'énergie (méthane) équivalente à au moins neuf millions de tonnes d'équivalent pétrole (9 Mtep) pourrait être obtenue à partir du traitement des déchets et des eaux usées en Europe.⁹⁴¹

L'intrant agro-énergétique des installations de fermentation anaérobie est de préférence obtenu à partir de déchets de production plutôt que de produits dédiés tels que le triticale, le sorgho et le maïs. Les aspects éthiques et environnementaux et la concurrence avec la chaîne alimentaire devraient être des raisons suffisantes pour écarter cette possibilité. La priorité doit être donnée à la production d'énergie à partir de la biomasse résiduelle, en exploitant et en utilisant les techniques de collecte et de traitement énergétique les plus efficaces. Il faut toutefois garder à l'esprit que des matériaux tels que la paille, les tiges de maïs, les déchets des entreprises alimentaires ou les déchets d'abattoirs ont presque toujours été recyclés, par exemple pour fabriquer des aliments pour animaux (les déchets d'abattoirs sont par exemple utilisés pour fabriquer des aliments pour animaux de compagnie).

Ne pas retirer les parties de plantes du champ signifie laisser des substances organiques et inorganiques dans le sol, ce qui contribue à maintenir la fertilité et à réduire le besoin d'apports extérieurs (par exemple, des engrais chimiques). C'est le cas, par exemple, pour les fruits ou les céréales, et cette pratique est considérée comme une bonne pratique agronomique si elle est bien gérée. Dans certains cas, cependant, la pratique consistant à laisser une partie des plantes cultivées sur le terrain présente des contre-indications, comme celle de favoriser la propagation des parasites des plantes. Par conséquent, avant d'utiliser les déchets de l'industrie alimentaire pour la production de biogaz, il sera nécessaire de procéder à des évaluations approfondies, en tenant compte de tous les aspects.

AGRO-MÉTHANE PROVENANT DE CÉRÉALES ET D'EFFLUENTS D'ÉLEVAGE

Le biogaz a un pouvoir calorifique (pouvoir calorifique inférieur ou PCI)¹ d'environ 5.000-7.000 kcal/m³ (équivalent à environ 6-8 kWh/m³) et une densité de 1,2 kg/m³ ; en comparaison, le méthane a une densité de 0,72 kg/m³ et peut fournir environ 9-12 kWh/m³. Le méthane pur a un contenu énergétique de 8.380 kcal/m³ (PCI), tandis que le biogaz a un contenu énergétique inférieur à celui du méthane, car il contient du dioxyde de carbone et d'autres gaz. On peut considérer que mille litres (1 m³) de biogaz équivalent à environ 0,6 L de diesel.

Grâce à des moteurs à combustion spéciaux, le biogaz peut être transformé en énergie électrique (avec un rendement maximal d'environ 21%) et en énergie thermique (avec un rendement maximal de 50%).⁹⁴¹ La forte concentration d'eau et la présence de fibres sont les principales

¹ Le *pouvoir calorifique supérieur* exprime la quantité de chaleur qui devient disponible à la suite de la combustion complète, à pression constante, de l'unité de masse, lorsque les produits de la combustion sont ramenés à la température initiale du combustible et du comburant. En général, cependant, les produits de la combustion sont libérés à une température plus élevée que la température initiale du combustible et du comburant. Ainsi, une partie de la chaleur théoriquement disponible est perdue sous la forme de gaz de combustion chauds (également composés de vapeur d'eau).

Le *pouvoir calorifique inférieur* est conventionnellement défini comme "le pouvoir calorifique supérieur moins la chaleur de condensation de la vapeur d'eau pendant la combustion". C'est la valeur à laquelle on se réfère habituellement lorsqu'on parle du pouvoir calorifique d'un combustible et du rendement d'une machine thermique. Ainsi, le pouvoir calorifique inférieur sera plus faible que le pouvoir calorifique supérieur et représente mieux la quantité de chaleur utilisable. La *chaleur de combustion* indique le contenu énergétique des combustibles et s'obtient en multipliant le poids, ou le volume, par le pouvoir calorifique inférieur.

raisons de la faible production de méthane issue de la fermentation anaérobie du fumier : entre 10 et 20 m³ de méthane par tonne de fumier traité. Ainsi, le fumier digéré contiendra toujours une certaine quantité de matière organique qui pourra potentiellement être utilisée, par exemple, par les plantes par le biais de la fertilisation.

On peut obtenir 230 m³ de méthane pour chaque tonne d'ensilage de maïs, contre environ 20 m³ pour le fumier de bovins sans paille.^{920, 942, 943} Comme on peut s'y attendre, pour le même poids, on peut obtenir dix fois plus de biogaz à partir du maïs. A titre de comparaison, les résidus de betteraves donnent 42 m³ de biogaz par tonne et les résidus de tomates 35 m³. Les matrices végétales ayant les meilleurs rendements énergétiques sont celles qui présentent des concentrations élevées d'hydrates de carbone facilement biodégradables (comme l'amidon), les protéines, l'hémicellulose pauvre et la lignine ayant une faible biodégradabilité.⁹⁴⁸

A partir de 20 m³ de méthane (que l'on peut théoriquement obtenir à partir de 1 m³ ou 2 m³ de biomasse telle que des déchets d'élevage ; le biogaz a une teneur en méthane variable, généralement comprise entre 50 et 70%), on peut espérer obtenir une production d'énergie d'au plus 133 kWh. Si l'on considère que 1 kWh correspond à 860 kcal et qu'un litre d'essence fournit environ 12 kWh, les 133 kWh (que l'on peut obtenir à partir de 1 m³ ou 2 m³ de biomasse comme le fumier) équivalent à l'énergie fournie par environ 11 L d'essence.⁹⁴⁴ Ainsi, à partir d'un mètre³ de biomasse comme les effluents d'élevage, il est encore possible d'extraire une quantité d'énergie équivalente à 7 à 11 litres d'essence.

La quantité de méthane que l'on peut obtenir à partir d'un hectare de maïs varie si l'on digère la plante entière de maïs plutôt que ses fractions, comme les grains (graines) seuls ou un mélange de grains et de graines. Pour la même quantité, le grain produira plus d'énergie. La production d'énergie la plus élevée par hectare, comme on pouvait s'y attendre, provient de la fermentation de la plante entière. Le maïs d'ensilage, avec les mêmes solides volatils, produit des quantités plus importantes de méthane, jusqu'à 25% de plus que le maïs non séché, car il contient moins d'eau.

La quantité maximale de matière sèche pouvant être obtenue à partir du maïs est de 30.000 kg et la quantité de méthane pouvant être obtenue par fermentation anaérobie du maïs peut être considérée comme étant comprise entre 5.000 et 10.000 m³ par hectare et par an.^{945, 946} La productivité en méthane des différentes biomasses dépend de la quantité et de la qualité de la matière organique contenue et est donc variable.⁹⁴⁷

La quantité d'énergie qui peut être obtenue à partir du fumier est inférieure à celle du maïs, car lors de la digestion dans l'intestin, une partie des substances organiques est utilisée (par exemple pour produire du lait).

Les installations produisant du biogaz à partir d'une fermentation anaérobie alimentée par des effluents d'élevage peuvent co-digérer avec des cultures dédiées, telles que l'ensilage de maïs, de sorgho et de triticale, afin d'augmenter le rendement énergétique. Le rendement en méthane est lié à la composition chimique, c'est-à-dire à la quantité et à la qualité de la matière organique. La fermentation anaérobie du maïs produira 9 à 10 fois plus d'énergie que la même quantité de fumier de bovins. C'est l'une des raisons pour lesquelles il semble économe en énergie d'utiliser des céréales, car les coûts énergétiques et environnementaux de leur production ne sont pas pris en compte.

La quantité de méthane entre 5.000 et 10.000 m³ par hectare et par an provenant de la fermentation du maïs correspond à la quantité nécessaire pour faire rouler trois petites voitures sur environ 25.000 km par an (on a considéré que 1 m³ de méthane correspondait à 10 kWh, tandis que 1 kg d'équivalent pétrole correspond à 11,63 kWh). En réalité, il s'agit d'un calcul purement théorique qui ne tient pas compte des coûts énergétiques encourus pour produire le méthane. Cette estimation ne comprend pas les coûts environnementaux indirects, tels que ceux liés à la production de maïs, à la construction et au démantèlement de l'usine après 15 ans, et bien d'autres encore.

Le biogaz ne peut être utilisé par un moteur de voiture que s'il est débarrassé des composants non méthaniques (par exemple, l'eau, le dioxyde de carbone) et s'il peut être comprimé et stocké, ce qui est coûteux et réduit le rendement énergétique (environ 6% de l'énergie contenue est consommée). En outre, au moins 8% de l'énergie électrique produite sera autoconsommée pour le fonctionnement de l'usine de biogaz elle-même.

Voici quelques valeurs de référence pour calculer l'équivalence énergétique entre 1 m³ de biogaz et d'autres combustibles :

- essence 0,8 L ;
- carburant diesel 0,6 L ;
- alcool éthylique 1,3 L ;
- méthane 0,6-0,7 m³ (le biogaz contient du méthane et d'autres gaz comme le dioxyde de carbone) ;
- charbon de bois 1,4 kg ;
- bois 2,7 kg.

Le biogaz, en ne considérant que la valeur du financement public de 0,28 centimes d'euro par kWh (tarif tout compris), a bénéficié d'une incitation à la production qui équivaut à payer plus de 3 euros pour un litre d'essence.

L'APPROVISIONNEMENT D'UNE USINE DE BIOGAZ

Pour obtenir la même quantité de biogaz que celle qui peut être produite à partir d'un hectare de maïs, on peut utiliser le fumier de 30 à 40 bovins ou de 200 porcs (pour l'engraissement). Si la centrale (0,9 MW_e) ne fermente que du maïs, elle a besoin de 500 ha (si elle fermente toute la plante) et de 830 ha par an (si elle n'utilise que le grain), sans tenir compte des hectares supplémentaires nécessaires pour assurer la rotation des cultures. Si l'usine est entretenue uniquement par le maïs (on achète toute la plante de maïs à 50 euros la tonne), 1.290.000 euros par an pourraient être gaspillés pour acheter ce légume pour la fermentation.

Si l'usine (0,9 MW_e) ne fermente que du fumier de bovins, elle a besoin du lisier d'environ 12.000 animaux (entre 7.000 et 20.000 bovins pesant entre 200 et 600 kg), ce qui nécessite à son tour au moins 4.000 ha pour produire des aliments pour animaux (entre 2.000 et 5.000 ha/an). Si tout le fumier doit être acheté (3 à 5 euros/t), il faut compter entre 360.000 et 600.000 euros par an pour l'approvisionnement.

La manipulation de la biomasse entrante (céréales ou fumier) et de la biomasse sortante (le produit digéré : entre 40.000 et 150.000 t par an) peut nécessiter entre 2.500 et 2.700 voyages de transport par an (aller simple avec des remorques de 30 t) pour les installations ne fermentant que des plantes entières de maïs, ou plus de 10.000 voyages de transport si du fumier de bovins est fermenté (aller simple). Si tous les transports ont lieu à une distance maximale de 10 km, cela peut représenter entre 4% et 15% de l'incitation. Si la chaîne d'approvisionnement se situe dans un rayon de 70 km, le transport peut représenter entre 8% et 47% de l'incitation, c'est-à-dire le tarif tout compris de 0,28 euro kWh (la chaîne d'approvisionnement dans un rayon de 70 km n'est pas viable si tout le maïs est acheté). Ces différences sont générées par les différentes possibilités telles que l'autoproduction complète ou l'achat de toute la biomasse nécessaire.

LE BILAN ÉNERGÉTIQUE DE LA PRODUCTION DE MAÏS

La domestication du maïs a probablement commencé dans les Amériques en 7000 avant Jésus-Christ, mais les principaux changements sont intervenus après la colonisation par les Européens. Le maïs moderne, comparé à son ancêtre (le téosinte), produit un épi trois fois plus concentré en glucides et plus de 1.000 fois plus grand.

Le plant de maïs peut être pollinisé par le vent, et le croisement artificiel est plus facile qu'avec d'autres espèces. Un tiers de la production mondiale de céréales est constitué de maïs, qui est cultivé sur une superficie de plus de 160 millions d'hectares (une partie est cultivée avec des plantes génétiquement modifiées, au moins 50 millions d'hectares) : plus de 14 fois la superficie agricole totale de l'Italie. ⁹⁸⁵ Les États-Unis sont le premier producteur mondial de maïs. Il est cultivé en rotation avec d'autres cultures (par exemple le soja ou le blé) ou, malheureusement, de manière continue pendant des décennies. ⁹⁴⁹ Un écosystème artificiel et simplifié se perpétue pendant des dizaines d'années, grâce à d'importants apports de matière et d'énergie.

En Italie, le maïs est principalement cultivé dans les régions du centre et du nord. Il représente à lui seul plus que la somme de toutes les récoltes de blé tendre et de blé dur et, malgré cela, il doit être importé.

Pour cultiver du maïs (*Zea mays* L.) en Italie, il est nécessaire d'irriguer et d'utiliser des produits phytosanitaires (par exemple, des herbicides et des insecticides). Il est semé lorsque les températures sont en permanence supérieures à 10°C, à une densité de 6-8 graines par mètre carré, selon l'hybride utilisé. Cela donne un rendement de 10 t/ha de céréales et les marges bénéficiaires pour l'agriculteur peuvent être très faibles.

Pour la culture du maïs, qui est utilisé pour produire de l'agro-méthane, il faut dépenser beaucoup d'énergie par fermentation anaérobie : ⁷⁴¹

- Pour cultiver un hectare de maïs, il peut être nécessaire de dépenser entre 1.300 et 2.200 euros par hectare et par an (sans compter certains frais comme le transport, l'ensilage, l'analyse du sol et l'achat d'engrais chimiques).
- La culture du maïs nécessite entre 600 L/ha et jusqu'à 1.200 L/ha de diesel par an. ⁹⁵⁰ Il convient de remarquer que différents types d'activités nécessitent différentes sources d'énergie ; par exemple, le transport et la production de pesticides dépendent principalement de produits pétroliers, tandis que la production d'engrais dépend du gaz naturel.
- Le maïs irrigué peut nécessiter entre 5 millions et 14 millions de litres par hectare et par an et, par conséquent, peut exiger au moins trois fois plus d'énergie que celle qui serait nécessaire pour produire la même quantité avec des cultures non irriguées, qui seront dans des zones plus humides.
- Pour couvrir les principales dépenses d'équipement et d'assurance nécessaires à la culture de 500 ha de maïs pour alimenter une centrale de 990 kW_e, en considérant 5 exploitations de 100 hectares chacune, on peut estimer qu'il faudra dépenser au moins 5.266.350 euros, TVA comprise, sur 15 ans.
- En considérant 5 exploitations de 100 hectares chacune, il sera nécessaire d'acheter des équipements d'un poids total d'au moins 194.250 kg (environ 389 kg/ha). ⁷⁴¹ On peut donc raisonnablement estimer, de manière optimiste, que des équipements d'un poids total d'environ 400 kg/ha seront nécessaires tous les 15 ans, ce qui correspond à environ 27 kg de matériel par hectare et par an. Si l'on part du principe que pour construire un kilo de matériel (par exemple, acier, composants électriques et électroniques, plastiques, caoutchouc), il est nécessaire d'investir trois kilogrammes de diesel, cela revient à devoir ajouter une consommation virtuelle de diesel pour le matériel comprise entre 50 et 60 g

de diesel pour chaque kilo de maïs (hors transport ; pour certains composants, la consommation pourrait être jusqu'à 10 fois supérieure à celle indiquée).

- Le transport du maïs dans un rayon de 70 km du champ (chaîne d'approvisionnement courte) nécessitera entre 130 et 190 L de diesel par hectare et par an, soit 12 à 18 g de diesel supplémentaires par kilo de grain (en supposant un rendement de 8.000 kg/ha).

De manière optimiste, il est possible d'estimer un rapport entre l'énergie investie et l'énergie obtenue (pour la production de maïs) entre 1,1 :1 et 1,9 :1, dans les meilleures conditions (chaîne d'approvisionnement à moins de 70 km et sans tenir compte des autres coûts tels que la cuisson, l'emballage et le transport jusqu'au consommateur). Le rapport est plus avantageux si le maïs est utilisé pour l'alimentation animale (en considérant un apport calorique de 2.000 kcal/kg, au lieu de moins de la moitié pour les graines utilisées pour la consommation humaine).

Ainsi, pour produire 1 kg de maïs, il faut investir entre 100 et 200 g de diesel, sans tenir compte de toute la consommation réelle. Le véritable avantage de ce système inefficace sur le plan énergétique est que pour produire 1 kg de maïs, il faut moins de 2 minutes de travail agricole humain dans les champs par an (sans compter le travail nécessaire à la construction des machines, des bâtiments, des routes et le travail nécessaire à l'extraction et à la production des combustibles ; sans compter le travail supplémentaire des travailleurs de la santé dû aux accidents, aux maladies des travailleurs et de la population). Pour obtenir environ 14.000.000 kcal par hectare de maïs, il est nécessaire d'investir moins de 9.000 kcal/ha par an en travail humain, ce qui correspond à la consommation d'énergie estimée en calculant un effort physique d'environ 250 kcal/h pendant 35 heures/ha par an. Si l'on ne considère que le travail de l'agriculteur dans le champ, le rapport entre l'énergie investie et l'énergie obtenue est supérieur à 1 :1.600, c'est donc un rapport très avantageux. Cependant, la conclusion est que la culture du maïs pour produire du méthane consomme tellement de carburant qu'il est moins coûteux d'utiliser directement du diesel que de construire la filière biogaz. ⁹⁴¹

LE BILAN ÉNERGÉTIQUE DE LA FILIÈRE BIOGAZ

Pour l'estimation de la durabilité économique et environnementale, il est arrivé que seul le bilan énergétique de certaines opérations liées à la production de biogaz soit mis en avant. Ces bilans approximatifs et partiels sont incorrects et permettent aux partisans des installations de biogaz de prétendre que le rapport entre l'énergie investie et l'énergie obtenue peut atteindre 1:25 ou 1:29. ^{943, 950, 952} En réalité, la production de biogaz pour obtenir de l'électricité à partir de la culture de céréales est un échec, car elle consomme plus d'énergie que ce qui est faisable. La production de maïs pour obtenir de l'électricité par fermentation anaérobie, même dans la chaîne d'approvisionnement à zéro kilomètre, consomme plus d'énergie que ce qui est réalisable. En général, le transport devient non rentable après quelques kilomètres seulement. En supposant que moins de 30% des fonds provenant du tarif tout compris soient consacrés au transport, le fumier doit être transporté sur une distance maximale de 10 km et le maïs sur quelques kilomètres de plus.

Une centrale de 0,9 MW_e qui fermente le fumier de 12.000 vaches laitières produit une quantité d'énergie qui ne couvre qu'une petite partie des besoins pour produire de la viande et du lait. Les calculs théoriques, qui constituent une sous-estimation considérable, montrent que l'énergie nécessaire pour cultiver 4.000 hectares afin de nourrir 12.000 bovins avec du fumier dans une usine de biogaz de 0,9 MW_e est au moins 14 fois supérieure à l'énergie obtenue. Cette estimation ne tient pas compte de plusieurs éléments : le transport, la production de lait et de viande, la chaîne du froid, la production d'emballages et la gestion des déchets, pour n'en citer que quelques-uns.

Pour obtenir de l'énergie (électricité et chaleur), si l'on brûlait toute la plante céréalière, on pourrait espérer obtenir un rapport entre l'énergie obtenue et l'énergie investie de 2 à 4 fois celui que l'on peut obtenir par la fermentation anaérobie.

La combustion de matrices ligneuses, telles que le peuplier, dans une chaudière pourrait également générer plus d'énergie ; 50% de plus que l'utilisation de la même surface pour la culture de céréales. L'utilisation de cultures pluriannuelles telles que le peuplier pour produire de l'énergie thermique à partir de la combustion présente plusieurs avantages environnementaux tels qu'une moindre érosion des sols (dans le cas des céréales, les terres restent souvent non cultivées en hiver) et une moindre utilisation d'engrais et de pesticides. La combustion directe, au lieu de la production de biogaz, génère également un autre effet qui pourrait être considéré comme positif dans la vallée du Pô : aucun digestat n'est produit (dans cette zone, la disponibilité des effluents d'élevage est supérieure aux besoins des cultures présentes à quelques kilomètres des exploitations).

En conclusion, l'énergie provenant du biogaz ne peut être considérée comme une source d'énergie renouvelable. Le tableau suivant présente quelques données.⁷⁴¹

Hypothèse de bilan énergétique pour une installation de biogaz de 0,9 MW_e utilisant uniquement du maïs (plante entière)

	Centrale de 0,9 MW_e utilisant uniquement du maïs (plante entière) ⁷⁴¹
Autoconsommation de l'électricité produite	Entre 10 et 20% de cette production
Consommation attribuable aux services auxiliaires et aux pertes jusqu'au point de livraison de l'énergie au réseau	11%
Consommation d'énergie thermique produite	Entre 20 et 30%.
Biogaz pouvant être obtenu par hectare	Entre 6.000 et 10.000 m ³ (équivalent à entre 3.600 et 6.000 L de diesel)
Énergie dépensée pour cultiver 1 ha de maïs (hors transport)	20 Gcal
Énergie électrique par hectare théoriquement réalisable à partir de la fermentation anaérobie, avec un rendement de 21-22%.	Entre 12.000 et 18.000 kWh/ha/an, correspondant à entre 10.320.000 et 15.480.000 kcal/ha/an
Surface nécessaire pour alimenter une centrale électrique de 0,9 MW _e produisant 7.200 MWh d'électricité par an (7.200 MWh x 86.000 kcal = 6.192 Gcal)	<u>Superficie minimale : 516 ha</u> (en utilisant la plante entière, sans tenir compte de la rotation ; productivité moyenne de 12 Gcal/ha)
<u>Rapport entre l'énergie dépensée pour la culture du maïs et l'énergie obtenue sous forme d'électricité (20 Gcal/ha)/(12 Gcal/ha)</u>	<u>1,7</u>
Électricité pouvant être obtenue par la combustion (sans fermentation) de la matrice végétale obtenue à partir d'un hectare (on considère un rendement de 20%).	31.146.000 kcal/ha (55.000 kg x 572 kcal/kg)
<u>Rapport entre l'énergie électrique obtenue par combustion directe de la plante (sans fermentation) et celle obtenue par fermentation anaérobie (par hectare/an, en supposant un rendement de 22%).</u>	<u>2,2</u> (31.146.000/14.000.000 kcal/ha)
Énergie en chaleur pouvant être obtenue théoriquement par hectare à partir de la fermentation anaérobie, avec un rendement de 50%.	Entre 25.000.000 et 33.000.000 kcal/ha/an
Chaleur pouvant être obtenue par la combustion (sans fermentation) de la matrice végétale obtenue à partir d'un hectare de maïs (rendement maximal considéré de 50%)	Entre 60.000.000 et 75.000.000 kcal/ha/an (équivalent à 4.050 – 5.070 L de diesel)
<u>Rapport entre l'énergie thermique (chaleur) pouvant être obtenue par combustion directe de la plante et celle pouvant être obtenue par fermentation anaérobie (par hectare/an, en supposant un rendement de 50%).</u>	<u>2,3</u> (70.000.000/30.000.000 kcal/ha/an)

Ces estimations ne tiennent pas compte de certains coûts énergétiques tels que ceux du transport et de la construction des installations, pour lesquels il est possible d'estimer une consommation d'énergie égale à l'énergie obtenue par la fermentation anaérobie réalisée par une installation de 1 MW pendant plus d'un an.

RÉFLEXIONS SUR CERTAINS IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DE L'AGRO-MÉTHANE ISSU DES CÉRÉALES

La promotion de l'utilisation des céréales pour produire du méthane a encouragé la consommation et la dégradation des sols. La co-digestion des céréales avec le fumier augmente le besoin de terre pour l'épandage. Avec la co-digestion, c'est-à-dire l'utilisation simultanée d'effluents d'élevage et de cultures dédiées comme le maïs, la quantité d'azote à gérer, pour un même nombre d'animaux, augmente proportionnellement à la fraction de végétaux fermentés dans l'installation. La co-digestion favorise la pollution de l'eau, l'eutrophisation et l'émission de gaz dangereux pour le climat. La fermentation anaérobie du fumier et des céréales ne modifie pas les quantités totales d'azote ni même de phosphore. C'est-à-dire que les quantités totales d'azote dans les produits digérés (à la fin du processus de fermentation) seront les mêmes que celles contenues dans le fumier et les céréales entrants. La fraction liquide du digestat représente environ 80% du volume et contient la plupart de certaines substances comme l'azote (ammoniac).

L'azote contenu dans les céréales retournera dans l'environnement après être passé par une fermentation anaérobie, qui transformera ses différentes formes en azote inorganique, principalement ammoniacal. Par conséquent, l'azote total ne diminue pas mais la fermentation anaérobie augmente sa mobilité dans l'environnement. Ainsi, une usine, si elle fait fermenter des céréales, génère une augmentation des polluants à gérer par épandage, comme les composés azotés, par rapport à la situation avant sa construction.

La co-digestion implique la nécessité de gérer plus de deux fois plus d'azote, de substances organiques et inorganiques et de volumes que le fumier seul, pour le même nombre d'animaux. Dans les années où les installations de biogaz produisant des céréales ont été promues, 38% de la zone agricole du Piémont et 80% de celle de la Lombardie ont été classés comme vulnérables en raison des concentrations élevées d'azote dans l'eau (2010) ; si l'on ne considère que la zone de la plaine (où les installations ont été construites), le pourcentage est beaucoup plus élevé.

Avec la généralisation des installations de co-digestion, c'est-à-dire la fermentation des effluents d'élevage et des céréales pour produire du méthane, il y a une incitation à utiliser les terres agricoles pour cultiver des céréales comme le maïs. Pour maintenir une centrale électrique de 1 MW_e qui ne produit du biogaz qu'en faisant fermenter toute la plante de maïs, plus de 500 ha sont nécessaires ; mais la superficie qui devra effectivement être utilisée sera plus importante en raison de la rotation nécessaire des cultures. Alors que pour obtenir 1 MW d'électricité avec des panneaux solaires, il faut couvrir une surface comprise entre 1,6 et 3,2 hectares, soit au moins 160 fois moins (un hectare correspond à 10.000 m², et équivaut à la surface occupée par trois terrains de football). Une surface encore plus petite est nécessaire pour atteindre 1 MW avec des éoliennes.

Dans le cas de la co-digestion, la surface nécessaire pour épandre le digestat est plus grande que celle nécessaire pour fournir les céréales.⁹⁵⁶

Les émissions atmosphériques du secteur agricole résultent de diverses activités, telles que la production et la distribution d'engrais, l'irrigation, la perturbation des sols et l'utilisation de pesticides. Le secteur agricole est responsable de 52 à 55% de toutes les émissions anthropiques mondiales de méthane et de 84% de toutes les émissions anthropiques mondiales d'oxyde nitreux (N₂O), la majorité provenant du secteur de l'élevage.^{53, 955} Globalement, les émissions mondiales du bétail, en équivalents de dioxyde de carbone, représentent plus de 20% des émissions mondiales. En Europe, les effluents d'élevage sont responsables de plus de 80% de toutes les émissions d'ammoniac provenant de l'agriculture.

La production agricole en Europe est responsable de 10% de toutes les émissions d'ammoniac (NH₃) et d'oxyde d'azote (NO). Par exemple, les rizières inondées sont probablement l'une des plus grandes sources d'ammoniac.

En ce qui concerne l'avantage généré par la réduction des émissions de gaz nuisibles au climat, la production de biogaz à partir de céréales est un échec.⁷⁴¹ On peut considérer que, en Europe et en Italie, la production d'énergie électrique génère une émission de dioxyde de carbone comprise entre 400 et 500 g/kWh_e. L'électricité est assimilée à :

- 0,23 tep/MWh si haute ou moyenne tension ;
- 0,25 tep/MWh si basse tension.

Par conséquent, si 2,8 kg de dioxyde de carbone sont générés par la combustion de 1 kg de diesel, 0,6 t de dioxyde de carbone sont produites à partir de 0,23 tep (tonne équivalent pétrole), et 0,5 t de dioxyde de carbone sont produites à partir de 1 MWh d'électricité. Les contributions en termes d'émissions sont très similaires.

Pour soutenir un fermenteur de 1 MW_e, il est nécessaire de cultiver plus de 516 ha de maïs, ce qui requiert un investissement direct par hectare compris entre 600 et 1.300 L de diesel, et un montant qui peut être supérieur car la somme due au transport, à la construction de machines et d'équipements, à la production d'engrais et de pesticides, à la transformation telle que la cuisson, à la production d'emballages et à la gestion des déchets. Ainsi, si un fermenteur de 1 MW_e produit au maximum 7.600 MW d'électricité en un an, cela signifie, selon une évaluation superficielle et erronée, avoir évité l'émission de 3.466 t de dioxyde de carbone par d'autres voies de production d'électricité (7.600.000 kWh x 456 g de CO₂ non émis par kWh). Ce dioxyde de carbone "non émis", comme l'indique le législateur, est celui qui serait émis avec la production d'électricité normalement utilisée par le mélange obtenu à partir de différentes sources : thermoélectrique, c'est-à-dire la combustion principalement de gaz naturel et de charbon, et hydroélectrique (en Italie, la plupart de l'électricité est produite par la combustion de combustibles fossiles).

On peut considérer que 1,8 kg de dioxyde de carbone est produit pour chaque kg de méthane et 2,4 kg pour chaque litre de diesel brûlé. Ces valeurs peuvent être utilisées pour avoir une idée approximative des bilans d'émissions.

L'avantage en termes d'émissions (3.648 t) proposé par le législateur est annulé par les émissions résumées dans le tableau ci-dessous.⁷⁴¹

Hypothèse de bilan des émissions dans la chaîne du biogaz (en équivalents CO₂ par an)⁷⁴¹

	Biogaz à partir de maïs (516 ha)	Biogaz à partir de fumier (12.000 vaches laitières nourries à partir de 4.000 ha)
Énergie maximale en électricité provenant de la production de biogaz (installation de 0,9 MW _e)	8.000 MWh/an	8.000 MWh/an
Dioxyde de carbone économisé par la production d'électricité à partir de biogaz, plutôt qu'à partir du mix électrique national (456 g CO ₂ par kWh)	3.648 t de CO ₂ par an (8.000.000 kWh x 456 g de CO ₂ par kWh)	3.648 t de CO ₂ par an (8.000.000 kWh x 456 g de CO ₂ par kWh)
Émissions provenant de la combustion du méthane contenu dans le biogaz	2.459 t de CO ₂	2.333 t de CO ₂
Émissions provenant du stockage du digestat sans récupération du méthane (5% de l'émission totale de méthane est considérée).	1.564 t de CO ₂	1.495 t de CO ₂
Émissions générées pour produire des engrais chimiques (en supposant 3 kg de CO ₂ /kg d'engrais chimique, et en supposant une utilisation de 500 kg d'engrais chimique par hectare et par an)	774 t de CO ₂ [(3 kg de CO ₂ /kg d'engrais chimique) x 500 kg/ha x 516 ha].	6.000 t de CO ₂ [(3 kg de CO ₂ /kg d'engrais chimique) x 500 kg/ha x 4.000 ha].
Émissions dues à l'utilisation de pesticides (5 kg de CO ₂ /kg de pesticide ; on suppose une utilisation de 5 kg/ha de pesticides par an)	12,9 t de CO ₂ (5 kg de CO ₂ x 5 kg de pesticides x 516 ha)	100 t de CO ₂ (5 kg de CO ₂ x 5 kg de pesticides x 4.000 ha)
Émissions provenant de la consommation de carburant pour la culture du maïs (600 L/ha x 2,4 kg CO ₂ /L ; <i>elles pourraient en fait être plus que le double</i>)	743 t de CO ₂ (1,44 t CO ₂ /ha x 516 ha)	5.760 t de CO ₂ (1,44 CO ₂ /ha x 4.000 ha)
Émissions de dioxyde d'azote provenant de la culture du maïs (en équivalents CO ₂)	1.847 t de CO ₂	14.304 t de CO ₂ (à partir de 4.000 hectares)
Émissions provenant de l'énergie consommée pour l'élevage du bétail	--	13.000 t de CO ₂
Émissions produites pour la construction de l'usine de biogaz (<i>il s'agit d'une sous-estimation</i>).	1.813 t de CO ₂	1.813 t de CO ₂
Émissions produites pour la construction des machines nécessaires à la culture du maïs (2 L de diesel par kilo d'équipement, soit <u>389 kg de machines par hectare</u>).	964 t de CO ₂ (389 kg x 516 ha x 2 L de diesel x 2,4 kg de CO ₂ /L de diesel)	7.469 t de CO ₂ (389 kg x 4.000 ha x 2 L de diesel x 2,4 kg de CO ₂ /L de diesel)
Émissions dues à la consommation de diesel pour fournir de la biomasse dans un rayon de <u>70 km</u> et pour épandre du digestat dans un rayon de <u>30 km</u> .	541 t de CO ₂	1.755 t de CO ₂
Émissions dues au seul transport, par 100 km, du maïs remplaçant le maïs retiré des exploitations pour produire du biogaz	460 t de CO ₂	--
Rapport entre les émissions générées et les émissions gagnées	3,1 (11.178/3.648) t de CO ₂	14,8 (54.029/3.648) t de CO ₂
<i>En résumé, dans toutes les conditions, le nombre de gaz nuisibles au climat générés est supérieur au nombre de gaz potentiellement économisés, bien que cette estimation ne tienne pas compte de toutes les émissions réelles.</i>		

Comme le montrent les données rapportées, la filière biogaz à partir de céréales ou d'effluents d'élevage uniquement (zéro kilomètre), en ne tenant compte que de certaines émissions, est un échec car elle consomme des ressources non renouvelables telles que le diesel, le sol et les matériaux (par exemple pour construire les machines) et génère plus d'émissions qu'elle n'en rapporte. Les estimations présentées sont une mauvaise représentation de la réalité car, par exemple, la consommation pour le transport, la construction de machines et d'usines est sous-estimée.

L'empreinte hydrique de la production d'agrométhane à partir de céréales est un autre aspect négligé et en même temps sous-estimé, surtout compte tenu du changement climatique qui rendra l'eau de plus en plus précieuse. Il convient de remarquer que l'eau utilisée est composée de trois éléments :

- L'eau verte, qui est l'eau de pluie.
- L'eau bleue, qui est l'eau de surface ou souterraine.
- Les eaux grises, qui sont l'eau nécessaire pour diluer les substances contenues jusqu'à des concentrations inférieures à des valeurs seuils arbitraires (par exemple, les réglementations sur l'eau potable). Cette fraction est la plus abondante et est souvent négligée.

La somme de ces trois fractions est appelée *eau virtuelle*.

Une estimation de la quantité d'eau nécessaire pour soutenir la production de céréales ou celle des effluents d'élevage utilisés pour alimenter une centrale électrique de 0,9 MW produisant de l'agrométhane est appelée "empreinte hydrique". Les principales utilisations de l'eau sont celles nécessaires à la culture du maïs et celles nécessaires à l'élevage de 12.000 vaches laitières. Dans ce dernier cas, l'utilisation de l'eau est partagée avec la production de viande et de lait. La production de viande et de lait nécessite l'ajout d'autres utilisations de l'eau, comme l'abattage, la pasteurisation, le conditionnement, le maintien de la chaîne du froid, ainsi que d'autres transports et la gestion des déchets. Une autre utilisation importante de l'eau est la construction de l'usine. Les estimations présentées ci-dessous sous-estiment certains intrants tels que l'utilisation de l'eau pour l'extraction et le transport du pétrole, qui peut être plus de 100 fois supérieure à celle considérée.

Il est réaliste de considérer qu'au moins 6 millions de tonnes d'eau par an sont nécessaires pour soutenir la production d'une usine de 0,9 MW brûlant du biogaz pour produire de l'électricité à partir de la plante de maïs. La consommation d'eau est multipliée par 7 si l'on utilise le fumier de 12.000 bovins laitiers (environ 42 millions de tonnes d'eau), mais une partie de cette eau est utilisée pour soutenir la production de lait et de viande. En conclusion, plus de 795.000 L d'eau seront nécessaires pour chaque kWh d'électricité produit à partir de la fermentation de toute la plante de maïs, ou 5.346.154 L/kWh dans le cas du biogaz produit à partir du seul fumier de bovins.⁷⁴¹ Cette quantité d'eau ne représente qu'une partie de l'eau réellement utilisée.

Nous parlons souvent de la consommation d'eau alors que l'eau utilisée est en fait restituée à l'environnement, mais polluée. Nous espérons donc que personne ne devra la boire ou l'utiliser pour l'irrigation. Ainsi, si l'on essaie d'estimer la quantité d'eau propre à utiliser pour diluer l'eau contaminée afin qu'elle puisse être réutilisée avec moins de risques, la consommation d'eau doit probablement être multipliée par un facteur d'au moins 1.000 ; cette dilution peut être nécessaire pour que l'eau grise se transforme en eau bleue, c'est-à-dire en eau qui n'est pas du tout contaminée. En supposant que l'eau digérée contienne 20 g/L d'azote ammoniacal (2%), il faudrait la diluer par un facteur de 40.000 pour atteindre la concentration autorisée dans l'eau potable (0,5 mg/L). Pour ramener les risques à des niveaux acceptables, il faut consommer beaucoup plus d'eau pour diluer les polluants et, dans tous les cas, il n'y a pas de retour à la qualité de l'eau initialement utilisée.

Malheureusement, il n'existe aucune règle concernant l'eau à utiliser pour l'irrigation, l'abreuvement des animaux, le nettoyage des étables ou d'autres opérations industrielles, mais l'eau potable est appelée à devenir de plus en plus précieuse, surtout dans certaines régions, il faut donc en prendre soin.

Globalement, la concurrence avec la chaîne agroalimentaire s'accroît, on produit de l'énergie qualifiée à tort de renouvelable en augmentant la consommation d'énergie non renouvelable, les émissions négatives dans l'atmosphère et l'environnement (eutrophisation et acidification des eaux) augmentent.

LE RISQUE BIOLOGIQUE EST SOUS-ESTIMÉ

Le produit sortant d'une installation de fermentation anaérobie est, d'un point de vue microbiologique, potentiellement pollué par une grande variété de micro-organismes. Les effluents d'élevage peuvent contenir des concentrations très élevées de micro-organismes (bactéries, parasites et virus). Pendant la fermentation anaérobie, certains micro-organismes potentiellement dangereux augmentent en nombre (par exemple, *Clostridium*). L'utilisation inappropriée des digestats, comme le fumier, entraîne un risque de contamination microbiologique des travailleurs (par exemple, les agriculteurs), de l'eau et des cultures. Ce risque est tout aussi important que le risque chimique, bien qu'il soit moins pris en compte.

Les micro-organismes sont normalement présents dans le fumier et leur concentration augmente chez les animaux malades. La fraction solide du digestat obtenu par fermentation anaérobie a une charge microbienne plus élevée que la fraction liquide, mais la fraction liquide constituera 70-80% du volume total. En général, la fermentation anaérobie a pour effet de réduire certaines charges microbiennes (bien que certaines catégories de micro-organismes augmentent), mais le produit digéré reste un bon substrat pour la croissance, même pendant le stockage. Certaines bactéries potentiellement dangereuses, comme *Clostridium perfringens*, continuent d'être présentes à la fin du traitement anaérobie mésophile. Les micro-organismes sporulés ne sont pas réduits par le traitement anaérobie mésophile. Les concentrations de certains micro-organismes tels que les *Entérocoques* (coliformes thermotolérants), les *Enterobacteriaceae*, la *Listeria monocytogenes* et la charge bactérienne mésophile à 37°C peuvent augmenter dans le produit digéré pendant le stockage.^{958, 959, 960} Ainsi, la co-digestion augmente réellement la quantité de micro-organismes distribués dans l'environnement, proportionnellement à la quantité de grains introduits dans le processus de fermentation, par rapport à ceux distribués par le fumier seul. L'augmentation du volume de matières contaminées par des micro-organismes à gérer par codigestion par rapport aux effluents d'élevage seuls augmente la probabilité de contamination de l'eau et des fruits et légumes. Un nouveau site à risque microbiologique, l'usine de biogaz, sera créé. C'est aussi une raison pour favoriser l'installation de petites usines dans les fermes, donc à zéro kilomètre et dimensionnées pour le seul fumier produit sur le site.

La fermentation anaérobie peut également être réalisée avec des matières organiques provenant de déchets d'abattoirs et de transformation de la viande, ce qui est beaucoup plus problématique d'un point de vue sanitaire. Ces matrices étant particulièrement risquées, il est toujours conseillé d'effectuer un traitement thermique, surtout si la matière digérée n'est pas destinée à la décharge mais à l'épandage en agriculture.

Dans les zones à forte densité d'élevage, comme certains départements du nord de l'Italie, la quantité de micro-organismes potentiellement dangereux libérés dans l'environnement est considérable. Si l'on considère qu'au Piémont nous devons gérer plus de 17 millions de tonnes par an d'effluents d'élevage (provenant de l'élevage d'environ 14 millions d'animaux, dont plus de 10 millions de volailles, 1 million de porcs et 800.000 bovins), avec une disponibilité pour l'épandage agricole de moins de 500.000 hectares, cela signifie théoriquement distribuer une

moyenne de 35 tonnes tous les 10.000 m². En moyenne, on dispose d'environ 3 à 4 kg de fumier par an et par mètre carré. Dans certains territoires, la disponibilité de 35 t par an est certainement sous-estimée, car 35 t de fumier peuvent être produites par une ou deux vaches laitières par an alors que, théoriquement, dans le Piémont, la densité moyenne d'animaux est plus élevée (exploitations sans terre). Ces valeurs sont également sous-estimées car les exploitations sont concentrées dans certaines zones et il n'est pas pratique de déplacer le fumier sur plus de 10-15 kilomètres. En outre, les engrais chimiques, le compost, les boues et l'eau des canaux de surface collectant les eaux usées (à des fins d'irrigation) sont également répandus sur les terres. À titre d'exemple, la bactérie pathogène *Salmonella enterica* sérotype *typhimurium* survit dans le sol pendant 203-231 jours et a été trouvée à la surface de radis et de carottes, respectivement 84 et 203 jours après le semis, dans des sols fertilisés par du fumier animal.^{885, 896} Si de l'eau contaminée (par exemple la fraction liquide du digestat issu de la fermentation anaérobie) est utilisée pour l'irrigation dans les jours précédant la récolte, le risque de propagation de maladies (par exemple des infections virales) par l'alimentation de légumes frais est très élevé. Selon certaines études, afin de réduire le risque de générer de nouvelles infections à moins d'un nouveau patient pour 10.000 personnes, l'irrigation avec de l'eau contaminée devrait être arrêtée au moins 14 jours avant la récolte des légumes destinés à être consommés crus.⁸⁹⁷ Pour certains types de contamination microbienne, 14 jours ne constituent pas une garantie suffisante.

La construction d'usines qui produisent du méthane à partir d'effluents d'élevage et de céréales aggrave la situation. Il y aura des volumes plus importants de substances organiques et inorganiques à traiter. Les volumes, avec le même nombre d'animaux élevés, augmenteront proportionnellement aux céréales utilisées et d'au moins deux ou trois fois, en raison de la dilution nécessaire lors de la fermentation anaérobie. Par conséquent, la quantité de micro-organismes à gérer augmentera également. Le produit de co-digestion digéré aura des concentrations microbiennes similaires à celles du produit digéré provenant du fumier seul, mais il aura un volume beaucoup plus important et donc une quantité plus élevée de micro-organismes.

La co-digestion des céréales (par exemple, du maïs avec du fumier de bovins) réduira la disponibilité des terres pour l'épandage, car les substances organiques et inorganiques produites par la culture de céréales sont recyclées et utilisées à nouveau pour soutenir les céréales l'année suivante. Seule une partie de certaines substances est utilisée pour produire du méthane. Le reste entre dans la plante (par exemple l'azote et le phosphore) et retourne au champ (les quantités ne varient pas si l'on exclut les pertes dans l'atmosphère et dans l'eau au cours des différents passages). Il sera également nécessaire de cultiver de nouvelles surfaces pour produire les aliments de remplacement pour ceux qui sont fermentés en anaérobiose. Ainsi, la co-digestion de céréales et de fumier augmente les risques microbiologiques car le nombre de microorganismes distribués augmente et la surface disponible pour l'épandage diminue, par rapport à l'utilisation du fumier seul.

Certains des risques microbiologiques présents en raison de la fermentation anaérobie des effluents d'élevage et des céréales sont résumés.

- 1) Le digest produit à partir d'effluents d'élevage avec de l'ensilage de maïs présente une charge microbienne de micro-organismes dangereux pour la santé humaine identique ou légèrement inférieure à celle des effluents d'élevage entrants, bien que certaines catégories de micro-organismes augmentent.

- 2) Le produit digéré reste un bon substrat pour la croissance des micro-organismes pathogènes, de sorte que leur concentration peut augmenter pendant le stockage avant épandage, annulant ainsi toute réduction obtenue (pour certaines espèces pathogènes à fermentation mésophile).

- 3) Les concentrations microbiennes seront similaires, mais sur un volume de matière digérée supérieur à celui des effluents d'élevage entrants, proportionnellement à la quantité

de céréales introduite et à la dilution nécessaire (en partant de matrices dont la quantité de matière sèche est même trois ou quatre fois supérieure à celle exploitée pour l'installation). En outre, la quantité d'azote à gérer en raison de l'utilisation de céréales et, par conséquent, l'étendue des terres agricoles nécessaires à l'épandage augmentent. L'installation de biogaz par co-digestion exige que l'exploitation dispose de plus de terres pour l'épandage qu'il n'en fallait auparavant pour distribuer le fumier. S'il n'est pas bien géré, le risque de pollution de l'eau, du sol et de l'air augmente.

4) Les installations de 0,5 à 1 MW_e favorisent la concentration en un seul lieu des effluents d'élevage produits sur plusieurs sites de la région, avec pour conséquence l'augmentation des problèmes connexes, y compris indirects, tels que le transport, qui générera de la pollution atmosphérique, des odeurs, de la poussière et du bruit.

5) Le site présentera un risque d'incendie et d'explosion.

En ce qui concerne le risque chimique, le produit digéré a des caractéristiques similaires à celles du lisier, mais comme nous l'avons déjà mentionné, il aura un volume plus important et donc ce risque potentiel augmentera également.

En conclusion, la co-digestion augmente la contamination microbienne et chimique de l'environnement. On trouve ci-dessous les pourcentages de présence de certains micro-organismes potentiellement pathogènes mesurés sur 12 échantillons mensuels de digestat de fumier de bovins et d'ensilage.⁹⁵⁷

LES MICRO-ORGANISMES PATHOGÈNES	Présence
<i>Salmonella</i> spp.	9,1%
<i>Escherichia coli</i> O157	46%
<i>Listeria</i> spp.	64%
<i>Yersinia</i> spp.	82%

DES INCITATIONS GÉNÉREUSES ET RATÉES

Le financement public de la production d'électricité à partir de la fermentation anaérobie d'effluents d'élevage et/ou de céréales était garanti à hauteur de 0,28 euro/kWh. Si l'on considère qu'une tonne d'effluents d'élevage par fermentation anaérobie peut produire 20 kWh d'électricité, cela signifie que jusqu'à 5,6 euros par tonne d'effluents d'élevage (0,28 euro/kWh x 20 kWh) pourraient être disponibles dans le cadre du tarif tout compris ; à cet égard, il est important de rappeler que le fumier de bovins était acheté à un prix compris entre 3 et 5 euros par tonne.

Dans le cas de la fermentation de la plante de maïs, le rendement énergétique théorique est dix fois supérieur à celui qui peut être obtenu à partir du fumier (200 kWh/t_e) et, par conséquent, le financement reçu du tarif tout compris équivaut à payer 56 euros par tonne de plante de maïs (0,28 euros/kWh x 200 kWh). Il convient de rappeler que le prix du marché de la plante de maïs, pendant les années où la plupart des plantes bénéficiant du tarif tout compris ont été construites, était d'environ 50 euros par tonne.

Les installations produisant moins de 1 MWh d'électricité, construites avant 2012, devaient bénéficier d'une incitation économique de 28 centimes par kWh, pendant au moins 15 ans ; il s'agissait du tarif tout compris (décret législatif 387/2003 ; art. 26 loi 222/2007 ; art. 2 loi 244/2007). Ce mécanisme de financement a permis, en effet, d'amortir des investissements de 2 millions d'euros en moins de 5 ans. Comme nous l'avons déjà souligné, cette incitation équivalait à payer plus de 3 euros pour un litre d'essence.

Les pays européens ont appliqué des incitations différentes : 18,5 centimes d'euro par kWh en Autriche, 26,7 centimes d'euro par kWh en Allemagne (2008) et, comme déjà écrit, 28 centimes

d'euro par kWh en Italie. Le mécanisme d'incitation a été rigide même si les différentes matrices utilisées génèrent des coûts ou des revenus différents. Certains pays européens, comme l'Allemagne, prévoient depuis de nombreuses années qu'une partie des contributions dues aux exploitants d'installations produisant du biogaz soit affectée à la culture du maïs. En Allemagne, la production de biogaz dans l'agriculture s'est rapidement répandue grâce à ces incitations qui finançaient l'utilisation des céréales avec des ressources publiques.

En Italie, cette incitation (le tarif forfaitaire) a été complétée par d'autres, comme celles des Régions. Le plan de développement rural de la région du Piémont, approuvé le 20/11/2007 et valable pour 5 ans, prévoyait un soutien économique aux agriculteurs utilisant du compost de 180 euros par ha et par an (la fraction solide du matériau digéré pouvait être compostée). Une autre aide a été soutenue par la législation communautaire encourageant la culture de céréales pour produire de l'électricité et de la chaleur ; par exemple, l'article 88 du règlement (CE) n° 1782/2003 prévoyait l'octroi d'une aide communautaire de 45 euros par hectare et par an aux surfaces ensemencées avec des cultures destinées à produire de l'énergie (électricité) telles que le maïs.

Selon les critères d'incitation fixés par les normes européennes et nationales, "*1 MWh d'électricité, produit par l'énergie éolienne ou par la fermentation anaérobie de la biomasse, peut produire un bénéfice équivalent à 456 kg de CO₂ non émis par des sources non renouvelables.*". La législation (décision 2001/405/CE de la Commission) indiquait que l'électricité injectée dans le réseau en Europe produisait en moyenne 400 grammes de dioxyde de carbone par kWh.

Avec un fermenteur de 1 MW, on peut choisir de cultiver soi-même plus de 500 ha et/ou d'acheter le maïs, et/ou d'utiliser les effluents d'élevage. Une centrale électrique de 1 MW_e produit entre 7.200 MWh et 7.660 MWh d'électricité par an, si elle fonctionne 355 jours par an sans interruption (la productivité maximale théorique est de 8.760 MWh par an, si elle fonctionne 365 jours par an). Un financement de 0,28 euros par kWh (comme cela est garanti depuis 15 ans en Italie) signifie recevoir une subvention annuelle, uniquement pour l'électricité injectée dans le réseau, comprise entre 1.713.600 euros (si l'on considère que 15% de l'électricité est autoconsommée) et 2.144.800 euros (dans ce deuxième cas, on considère que l'électricité non injectée dans le réseau est de 10%). En réalité, l'électricité vendue étant payée à un prix plus élevé que l'électricité achetée, il est intéressant de ne pas autoconsommer l'électricité produite.

Dans les meilleures conditions, le financement de 0,28 euro par kWh a permis d'entretenir l'installation en achetant tout le maïs et/ou le fumier nécessaires. En réalité, il existe d'autres coûts importants comme le transport, mais aussi d'autres financements possibles, comme ceux de la culture du maïs ou de la construction de l'installation de fermentation. La forme la plus économique est celle où les propriétaires du fermenteur sont les agriculteurs, car ils disposent gratuitement d'au moins une partie du fumier nécessaire et souvent d'une partie des terres pour cultiver du maïs et pouvoir épandre les produits digérés. Mais le tarif tout compris a été si généreux que le maïs et le fumier ont été achetés.

Il est important de remarquer que le financement (de 0,28 euros par kWh) était garanti pour 15 ans, de sorte que chaque centrale de 1 MW_e aura reçu 33 millions d'euros de soutien à la fin de cette période ; une belle fortune pour les propriétaires des centrales en service en Italie mais un gaspillage pour la collectivité.

Cependant, l'énergie produite à partir de biogaz est rémunérée par une incitation équivalente à un paiement de plus de trois euros par litre de diesel, alors que le diesel agricole consommé pour le transport est payé moins d'un euro par litre. Ainsi, si l'on est attentif à la gestion du transport, la spéculation est très pratique : 3.000.000 L d'équivalent diesel en biogaz, obtenu à partir de plus de 516 ha de culture de maïs, est payé comme plus de 9.000.000 L de diesel dérivé du pétrole.

Les incitations présentées ne sont qu'une fraction de celles qui étaient réellement à la disposition des entrepreneurs.

Plus de 1.000 installations de biogaz construites en Italie ont profité du mécanisme de tarif tout compris : 0,28 euro par kWh (à partir de 2015). Les agriculteurs sont probablement le *lobby* qui vit le plus longtemps sur la planète, et l'on peut également affirmer que le sort de la planète est, dans une large mesure, entre les mains des agriculteurs. Les intérêts privés et les règles économiques égoïstes ont conduit à des choix qui profitent à un petit nombre : le petit nombre contre le grand nombre. Le principe cardinal sur lequel tout tourne est celui de la maximisation des profits de quelques-uns dans le temps le plus court possible. Le secteur de la production de méthane par fermentation anaérobie est l'un des nombreux mécanismes spéculatifs qui se sont succédé dans le secteur agricole au fil des décennies. Les coûts réels, tels que ceux de la production d'énergie, de la culture des plantes et de la viande et des produits carnés, sont réduits, et les évaluations environnementales, telles que celles de la consommation d'eau et de sol, ne sont pas effectuées.

La conception des nouvelles centrales n'était pas le résultat d'évaluations environnementales, mais était conditionnée par le mécanisme d'incitation. Pour obtenir la spéculation maximale possible, il a fallu construire des installations d'une puissance électrique de 999 kW, fermenter l'ensilage, ne pas récupérer la chaleur produite et ne pas récupérer le méthane de la matière digérée. En fait, cela a été le cas pour la plupart des installations financées. Les mesures d'incitation ont favorisé des choix ratés tels que :

- Cultiver des céréales pour produire du biogaz.
- Ne pas utiliser l'énergie thermique produite ou l'utiliser pour des activités inutiles, comme l'évaporation de l'eau de la matière digérée pour en réduire le volume ; dans ce cas, cela signifie utiliser plus de 50% de l'énergie produite pour évaporer l'eau, qui est en grande partie ajoutée pour diluer la matière sèche fournie par l'ensilage : un énorme gaspillage. Cette stratégie a été réglementée par des règles régionales et des normes volontaires telles que la norme UNI 10458 de 2011.
- Favoriser le transport des matières premières (maïs) et des matières sortantes (digéré) sur des distances excessives (plus de 15 km).
- Augmentation de la charge organique et polluante, pour le même nombre d'animaux élevés, à gérer dans des territoires où la dégradation est déjà élevée en raison d'une disponibilité insuffisante du sol par rapport à la biomasse des animaux élevés. La contamination des eaux (eutrophisation, nitrates) a été favorisée.
- Augmenter l'imperméabilisation des terres agricoles et leur concrétisation. Une usine produisant 990 kW d'électricité par la fermentation anaérobie de fumier et de céréales peut occuper une surface comprise entre 20.000 et 30.000 mètres carrés, dont au moins un tiers est couvert ou étanche.
- Spéculer et gaspiller des ressources. L'une des techniques proposées pour continuer à fermenter les céréales afin de produire du biogaz et des engrais (les digestats), dans des zones telles que la vallée du Pô où les eaux de surface sont déjà gravement compromises, est le *stripping*. Il s'agit d'une technique de réduction de l'azote à forte intensité énergétique qui nécessite l'utilisation d'acides et d'un nouveau dispositif. Les coûts et la consommation d'énergie augmentent donc, tandis que les profits de la spéculation diminuent. Les risques de cette approche sont sous-estimés : si le processus de séparation et de production de sels (d'ammonium) n'est pas réalisé avec les précautions nécessaires, l'ammoniac passe du digestat à l'atmosphère. Cependant, même dans les meilleures conditions, l'efficacité de l'élimination de l'ammoniac n'atteint jamais 100% (elle est au maximum de 40% à 70°C). Une grande quantité d'énergie thermique et électrique doit être utilisée. L'énergie thermique produite par la cogénération peut ne pas être suffisante pour maintenir la température des fermenteurs et, en même temps, fournir la chaleur nécessaire pour effectuer la séparation de l'ammoniac avec

l'efficacité maximale souhaitée. Par conséquent, des températures plus basses (60°C ou moins) seront utilisées, ce qui entraînera une efficacité d'élimination encore plus faible.⁹¹⁸ Ce type de spéculation économique qui fait passer des investissements inutiles pour des investissements respectueux de l'environnement devrait être interdit.

○ Promouvoir des hypothèses non durables, comme l'utilisation de la production de méthane (biogaz) issue de la culture des céréales pour obtenir l'énergie nécessaire à la production d'engrais minéraux azotés.⁹¹⁷ Dans ce cas, un cycle futile est généré dans lequel la seule activité réelle est le financement public. La culture des céréales nécessite la production d'engrais minéraux, qui sont à leur tour produits grâce à l'énergie dérivée du méthane fermenté par les céréales elles-mêmes. On élève des micro-organismes qui consomment notre nourriture, notre eau et indirectement notre sol.

○ Envoyer le digestat ou sa fraction liquide dans une décharge ou une station d'épuration et le rejeter dans les cours d'eau de surface.⁹²⁰

Des solutions non durables ont été proposées, qui peuvent être considérées comme des placebos bureaucratiques, qui impliquent une volonté de ne pas entraver la spéculation de la part des entrepreneurs et une grande superficialité, ignorance ou collusion de la part de ceux qui les autorisent et qui pourraient, au contraire, imposer des limites et des conditions. Pour mieux comprendre l'ampleur du gaspillage économique, nous pouvons comparer la production d'énergie des éoliennes. Une seule hélice, dont les pales tournent à une hauteur de 80 m au-dessus du sol (à terre), peut avoir une puissance de 1.800 kW, ce qui équivaut à la production de deux usines de biogaz de 900 kW nécessitant plus de 1.000 ha de terres céréalières.

Aucune valeur n'est accordée à la manière dont l'énergie produite sera utilisée. Il convient de rappeler que pour mettre en place cette chaîne énergétique, l'électricité est payée au moins quatre à six fois le prix auquel elle est vendue sur le marché, grâce à des financements publics, mais une partie de l'énergie produite peut être utilisée de manière peu convaincante pour chauffer des piscines, sécher du maïs pour la digestion ou évaporer l'eau du produit digéré. Au final, on utilise les ressources publiques, on augmente la consommation d'énergie non renouvelable, on déplace des centaines de tonnes de biomasse par la route, on gaspille l'eau, on cultive des centaines d'hectares de maïs pour nourrir des micro-organismes intestinaux dans des fermenteurs, sans aucune réflexion.

Les installations qui n'utilisent pas de chaleur ont été autorisées et les coûts environnementaux et énergétiques indirects n'ont pas été évalués. Les énergies classées comme renouvelables ont été encouragées par une consommation accrue d'énergies non renouvelables (transports, cultures) et des ressources limitées telles que les sols agricoles et l'eau d'irrigation. Les incitations en faveur des énergies renouvelables n'ont pas suffisamment pris en compte des indicateurs très importants qui devraient être utilisés pour moduler la promotion. Pour donner un exemple, l'autoconsommation de chaleur et d'électricité réduit les pertes dues aux transferts et au transport de l'énergie, elle est donc plus efficace et devrait être privilégiée ; mais les systèmes incitatifs exigent nécessairement la distribution au réseau et la vente à un prix garanti, bien plus élevé que le prix du marché. L'énergie provenant de sources non renouvelables consommée pour faire fonctionner une installation de biogaz n'est pas prise en compte, alors qu'elle annule les avantages en termes d'énergie et d'émissions (en termes de gaz altérant le climat). La production d'électricité et de chaleur par co-digestion, c'est-à-dire à partir d'effluents d'élevage et de céréales, utilise une énergie qui n'est actuellement pas évaluée dans le compte énergétique de ces installations.

L'utilisation de matrices telles que les effluents d'élevage et les déchets, comme la fraction organique des déchets solides municipaux (OFMSW), et les boues d'épuration devrait être plus fortement encouragée pour la production de biogaz. Avec la réserve, toutefois, que les digestats obtenus à partir de déchets (tels que les déchets d'abattoirs ou les boues d'épuration) sont

beaucoup plus dangereux que le fumier et que, par conséquent, leur utilisation agricole comme engrais doit être évitée.

La législation européenne a encouragé l'utilisation de la biomasse (par exemple, les céréales) pour produire des agrocarburants (directive 2009/28/CE). En Europe, l'un des objectifs proposés était de produire, avant 2020, au moins 10% du total des carburants utilisés pour le transport routier à partir de sources qualifiées de renouvelables (agroéthanol, agro-méthane, agro-diesel), mais l'affectation de terres agricoles à la production d'agrocarburants est difficilement acceptable d'un point de vue éthique et environnemental.

Plusieurs documents officiels, qui prévoient une augmentation de l'économie d'énergie non renouvelable et une augmentation de l'utilisation d'énergies présentées comme renouvelables (par exemple l'agro-méthane et l'agro-éthanol), prévoient qu'au moins 5% des terres agricoles soient affectées à la production d'énergie. Par exemple, dans le Piémont, en 2009, il était prévu d'affecter 5% des terres cultivées à la production d'agrocarburants (DGR du 28 septembre 2009, n. 30-12221, qui a approuvé le rapport programmatique sur l'énergie). Ces intentions ne sont pas très intelligentes. Il aurait été beaucoup plus clairvoyant d'utiliser ces ressources économiques pour des objectifs utiles à la transition nécessaire pour obtenir de la nourriture de manière durable. Au lieu de gaspiller des terres pour produire des agrocarburants, qui sont une source d'énergie non renouvelable, on aurait pu aider les agriculteurs à consacrer au moins 10% de leurs terres agricoles à la renaturalisation. L'augmentation de la biodiversité apporte également des avantages considérables à la production alimentaire. Le système agricole ne peut plus se permettre de perdre la fertilité des sols et doit épouser l'économie des combustibles fossiles. Les ressources publiques doivent être gérées de manière plus prospective et avec une vision de l'avenir moins énergivore.

En 2015 (septembre), 1.340,4 millions d'euros ont été financés par des fonds publics pour les installations produisant du biogaz par le biais du tarif tout compris, 83,4 millions d'euros pour les installations produisant du biogaz par le biais du mécanisme de certificat vert, et 43 millions d'euros pour les petites installations utilisant les tarifs post-2012 (www.gse.it). Environ 5.767 millions d'euros ont été dépensés en incitations directes pour toutes les énergies renouvelables, dont environ 1.500 millions d'euros pour les installations produisant du biogaz ; comme déjà décrit en détail, il y a également eu d'autres formes d'incitations indirectes pour l'agrométhane.

Le seul avantage réel est pour les investisseurs qui auront récupéré leur investissement en quelques années et percevront un rendement substantiel pendant encore au moins dix ans.

La production de biogaz à partir de fumier ne peut même pas compenser une partie des émissions générées par l'élevage. La chaîne du biogaz aurait donc pu être l'une des technologies permettant de réduire certains des impacts environnementaux négatifs de la production de viande, de lait et de produits laitiers. En conclusion, la filière biogaz produit une énergie non renouvelable.

LA MACHINE BUREAUCRATIQUE N'A PAS PROTÉGÉ LA COMMUNAUTÉ

La machine bureaucratique ne peut plus être gérée facilement, même par les meilleurs administrateurs. Elle est devenue trop complexe et souvent incompréhensible, avec de fortes contradictions et aucune traçabilité des règles sectorielles. Il n'est pas facile d'identifier les exigences obligatoires pour toute activité ou initiative. L'une des stratégies utilisées par les administrateurs locaux, tels que les municipalités, pour entraver la construction d'installations de biogaz consiste à faire appel à des arguties formelles. Cette stratégie, si les politiciens sont

déterminés, peut facilement mener à la victoire pour la simple raison qu'il existe des milliers de règles, et que les connaître toutes et les respecter en même temps est impossible.

Malgré le fait que l'appareil bureaucratique se prête très bien à ralentir, voire à inhiber toute action entrepreneuriale, comme celles en faveur de la production de biogaz, plus de 1.000 installations ont été construites en quelques années, sans avoir garanti la nécessaire protection de l'environnement qu'au moins le bon sens aurait pu suggérer.

Pour les démarches administratives initiales nécessaires à l'obtention de l'autorisation de construire une installation mettant en œuvre la fermentation anaérobie (0,9 MW_e) et du financement (tarif forfaitaire pendant 15 ans), il a fallu dépenser au total moins de 10.000 euros. Le paiement du travail effectué par des organismes tels que l'ASL et la Province a eu un impact négligeable sur les dépenses que les entrepreneurs ont dû prévoir ; bien que, dans certains contextes, les travailleurs des organismes publics aient certainement consacré beaucoup de ressources et d'énergie à l'évaluation de la documentation préliminaire. En fait, ces dépenses ont été réparties sur l'ensemble des contribuables, c'est-à-dire la population, de manière apparemment invisible. Il s'agit d'un autre avantage économique indirect.

Nous devons réfléchir à un aspect important : une petite communauté peut-elle être libre de choisir ce qu'elle veut faire du territoire dans lequel elle vit, surtout si l'objectif principal est la protection de l'environnement et le bien-être collectif ? Peut-on se défendre contre des règles injustes ? Les communautés devraient avoir toute autorité pour défendre leur propre territoire si les choix locaux vont dans le sens d'une plus grande protection de l'environnement, indépendamment des politiques nationales.

Toute proposition visant à gérer la protection des terres et des communautés, et en même temps une planification prudente des dépenses publiques, bénéficiera certainement d'une meilleure gestion de certains aspects tels que :

- élever le niveau culturel (formation et information) de l'ensemble du système (administrateurs et population) ;
- assurer une méritocratie plus saine dans la sélection des administrateurs du bien public ;
- exclure les décideurs politiques des évaluations techniques, notamment en cas de doute sur un éventuel conflit d'intérêts ou un manque d'impartialité ;
- simplifier les règles ;
- assurer la certitude dans l'application des sanctions, qui devraient être mieux modulées, notamment pour les crimes environnementaux.

L'un des objectifs les plus importants pour l'avenir pourrait être de concevoir et d'organiser l'ensemble du système public de manière à ce qu'il y ait un plus grand professionnalisme dans la fourniture de conseils en matière de protection de la santé et une plus grande capacité à influencer les choix qui préservent le principe de protection des intérêts collectifs.

CONSÉQUENCES D'UN EXEMPLE D'ÉCOCIDE PLANIFIÉ

Pour remplacer tout le pétrole consommé sur la planète par des agrocarburants, il faudrait une surface agricole au moins quatre fois plus grande que celle existante, donc quatre autres planètes semblables à la Terre à coloniser (en réalité, ce n'est pas nécessaire car on utilise plus d'énergie, en termes d'équivalent pétrole, qu'on en obtient). La diffusion des installations de biogaz n'a été possible que grâce à des incitations publiques, théoriquement destinées à contribuer à la protection de l'environnement. Si l'on évalue soigneusement le bilan énergétique et les incidences environnementales de toutes les opérations nécessaires, l'usine de biogaz est inefficace et consomme en fait beaucoup d'énergie non renouvelable et n'apporte pas les avantages environnementaux escomptés, tels que l'atténuation du changement climatique. Les impacts négatifs augmentent à mesure que l'autosuffisance en matière d'approvisionnement en

matrices de fermentation diminue, que la disponibilité de terres agricoles pour l'épandage à proximité de l'usine diminue et que l'utilisation de céréales augmente. Paradoxalement, les ressources publiques ont été utilisées pour encourager des comportements peu efficaces d'un point de vue énergétique et environnemental, comme l'utilisation de céréales pour produire du méthane et de l'électricité, en faisant passer l'ensemble de l'opération pour écologique et prioritaire pour la communauté.

Si aucune contrainte n'est imposée à l'utilisation de cultures telles que les céréales pour produire de l'agro-énergie, le résultat sera le suivant :

- Encourager une réduction de la biodiversité.
- Diminuer la disponibilité de la nourriture.
- Diminuer la disponibilité des aliments pour animaux.
- Dégrader de manière croissante des sols et des eaux (pollution et eutrophisation).
- Augmenter la consommation d'eau pour l'irrigation et encourager la contamination.
- Importer des céréales telles que le maïs et d'autres plantes importantes pour l'alimentation humaine et animale. Les coûts énergétiques du transport et les aspects éthiques (exploitation de la pauvreté dans des territoires éloignés) augmentent considérablement, ce qui est insoutenable et inacceptable.
- Favoriser la déforestation et d'autres problèmes environnementaux dans les pays lointains.
- Encourager la culture d'organismes génétiquement modifiés (par exemple, le maïs et le colza).
- Augmenter les prix des céréales, c'est-à-dire des prix des denrées alimentaires et des aliments pour animaux. Des études ont montré depuis longtemps que 75% de l'augmentation des prix des denrées alimentaires dans le monde entre 2002 et 2008 était également due à l'augmentation de la production d'agrocarburants.⁹⁵³
- Augmenter les prix de location et de vente des terres agricoles.
- Augmenter la consommation d'énergie non renouvelable pour produire de l'énergie étiquetée comme renouvelable.
- Augmenter l'utilisation des pesticides (herbicides, fongicides et insecticides).
- Augmenter le nombre de substances dangereuses à gérer et donc de polluants par unité de surface (par exemple, métaux, composés azotés).
- Augmenter le trafic automobile et les impacts générés (par exemple, les émissions dans l'atmosphère).
- Favoriser le changement climatique également par l'augmentation des émissions de gaz altérant le climat, la réduction de la biodiversité, la pollution de l'eau et la dégradation des sols.
- Le gaspillage des ressources publiques pour entretenir des cultures destinées à produire des déchets utilisés pour la récupération d'énergie est moins efficace que d'autres solutions, comme la combustion de cultures dédiées à cet effet ou l'installation d'éoliennes.

Si la surface cultivée avec les céréales nécessaires pour nourrir les micro-organismes d'un fermenteur de 1 MW_e était utilisée pour l'alimentation humaine, l'équivalent des besoins caloriques de plusieurs milliers de personnes pendant un an (au moins 2.000) serait disponible. L'énergie obtenue pour l'alimentation animale serait encore plus élevée, puisque la plante entière peut être utilisée (40-60 millions de kcal/ha par an).

Pour pouvoir remplir efficacement la fonction principale pour laquelle elles doivent être conçues, à savoir la récupération d'énergie à partir de matrices de déchets qui sont de toute façon produites pour une autre finalité primaire, à savoir l'alimentation de l'espèce humaine, ce type d'installations doit être géré différemment. Des aides financières excessives provenant de ressources publiques et l'absence de règles contraignantes (par exemple sur la consommation d'énergie non renouvelable, sur l'utilisation des céréales, sur l'utilisation des sols et de l'eau) ont favorisé des conditions inacceptables d'un point de vue éthique, environnemental, sanitaire et

donc économique. Si l'on continue à ne pas accorder de valeur aux impacts environnementaux négatifs (par exemple la pollution) et à ne pas prendre en compte les aspects éthiques, alors, paradoxalement, selon certains courants de pensée superficiels et à courte vue, encourager la production d'agrocarburants avec des ressources publiques peut conduire à une mauvaise interprétation positive de certains indicateurs de richesse économique tels que le PIB ou le produit intérieur brut.

Les estimations présentées dans ce chapitre comportent probablement de nombreuses inexactitudes, mais l'ordre de grandeur est réaliste. Les bilans économiques et environnementaux, comme ceux des émissions, montrent que la filière biogaz n'est en fait pas durable et pas renouvelable, qu'elle utilise uniquement des céréales ou uniquement des effluents d'élevage. En effet, ces derniers sont produits par des systèmes intensifs, qui transforment de manière inefficace le pétrole en nourriture. Par conséquent, la filière biogaz, même la plus efficace, n'est pas en mesure de compenser ne serait-ce qu'une partie du bilan des émissions produites par le bétail. La filière biogaz, appliquée uniquement aux effluents d'élevage et aux kilomètres zéro, doit être considérée comme un moyen utile de réduire la quantité de polluants distribués sur les sols agricoles et dans l'environnement, et comme un complément aux besoins énergétiques des systèmes de production gourmands en énergie, comme la production de viande bovine. Elle ne peut être qualifiée d'énergie renouvelable car l'énergie investie est supérieure à l'énergie obtenue, et c'est une stratégie qui n'est possible qu'en augmentant la consommation de combustibles fossiles. L'avantage souhaité en matière d'émissions n'existe pas non plus réellement, car il est annulé par les activités préliminaires nécessaires à la production de biogaz. Le législateur présente à tort ces énergies comme des énergies renouvelables, car il se réfère uniquement à l'activité de combustion du biogaz, sans examiner les émissions produites tout au long de la chaîne, comme celles générées par la culture, la production de viande et de produits dérivés, et la gestion des produits digérés.

Le principe général qui devrait être appliqué dans tous les secteurs devrait être qu'aucune subvention ou concession ne devrait être accordée à toutes les activités qui ont un impact sur l'environnement et en particulier sur la production alimentaire, la qualité de l'eau et de l'air, et la consommation des sols. Au contraire, les taxes écologiques devraient être augmentées pour toutes les activités qui compromettent l'avenir.

UNE EXTERMINATION ÉCOLOGIQUE : LA DESTRUCTION IRRÉVERSIBLE DE LA BIODIVERSITÉ

LE PARADIS EST UN JARDIN

Lorsque l'on demande à des lycéens pourquoi les arbres sont importants, ou que l'on essaie d'expliquer pourquoi il est essentiel de les planter plutôt que de les couper, on se rend compte à quel point l'ignorance en matière d'environnement est répandue et à quel point l'enseignement scolaire actuel est inefficace sur certaines questions écologiques. L'analphabétisme environnemental est si répandu que les arbres des villes sont coupés parce qu'ils salissent les voitures ou parce qu'ils abritent des oiseaux dont le chant nous dérange et dont les fientes nous salissent (encore). Au Paradis, qui a toujours été représenté comme un jardin luxuriant, l'homme faisait partie intégrante de la nature, mais depuis quelque temps, l'homme et la nature sont irrémédiablement séparés. Cette prémisse était fonctionnelle dans la volonté de rappeler, avant tout, aux plus de 50% de la population de la planète qui vit dans les villes (au moins 67% des habitants italiens vivent en ville), pourquoi les arbres sont une ressource biologique, environnementale, énergétique et sociale :

- Les arbres sont indispensables à notre vie, sans eux nous ne pourrions pas vivre : ils produisent l'oxygène que nous respirons.
- Les arbres et les espaces verts augmentent la valeur écologique et la biodiversité d'environnements tels que les zones urbaines.
- Les arbres contribuent à atténuer les effets négatifs de l'homme sur le climat, en contrebalançant l'effet de serre par la production d'oxygène et l'absorption de dioxyde de carbone. En ce qui concerne le dioxyde de carbone, un arbre à feuilles persistantes (avec une couronne d'au moins 30-40 m³) absorbe quelques kilos de dioxyde de carbone par an. Pour absorber tout le dioxyde de carbone produit par une petite voiture diesel parcourant 20.000 km par an, il faut 4 à 5 ha (plus de 16 terrains de football) de forêt mature (dont les arbres ont plus de 20 ans). Dès que les arbres sont brûlés, le dioxyde de carbone retourne dans l'atmosphère.
- Les arbres réduisent la température de l'air, ce qui est très utile pendant les mois les plus chauds. Ils ont une fonction thermorégulatrice, grâce à l'effet d'une évapotranspiration accrue (les zones urbaines ont des températures plus élevées que les zones vertes, entre 0,5 et 3 degrés Celsius en moyenne). À Chicago (États-Unis), on a estimé que si l'on augmentait la couverture arborée de 10%, ou si l'on plantait trois arbres par bâtiment, cela permettrait d'économiser 50 à 90 dollars par unité de logement (par an) pour le chauffage et le refroidissement.⁹⁶³
- Les arbres améliorent la qualité de l'air : ils absorbent le dioxyde de carbone et d'autres substances. Les arbres ont une fonction sanitaire et hygiénique, liée à l'épuration

chimique de l'atmosphère, la fixation des gaz toxiques, l'épuration bactériologique, l'absorption des poussières fines et autres polluants. Il a été démontré que certaines plantes sont capables d'absorber jusqu'à 2 milligrammes de formaldéhyde de l'air (*Fatasia japonica* et *Nephrolepis exaltata*, une fougère à feuilles persistantes) ou un demi-milligramme de xylène par heure.⁹⁸⁶ D'autres substances qui peuvent être absorbées sont le benzène (par exemple *Crassula portulacea*), l'ammoniac (par exemple *Nephrolepis exaltata*) ou les composés organiques volatils.

- La verdure urbaine et la présence d'arbres diminuent l'apparition de l'asthme chez les enfants, qui est l'une des principales maladies de l'enfance.^{721, 964}
Le nombre de décès liés à la pollution automobile dépasse celui des accidents de la route (en Italie, en 2018, 172.553 accidents de la route avec dommages corporels ont été enregistrés, entraînant 3.334 décès et 242.919 blessures).⁸²⁹
- Les arbres empêchent l'érosion (ils rendent le sol plus stable) et la réduction de la fertilité du sol sous-jacent. Les arbres améliorent l'absorption de l'eau de pluie lors des précipitations (évitent la stagnation) et réduisent la violence de la pluie. On estime que les arbres peuvent retenir entre 7% et 22% de l'eau de pluie qui pourrait s'accumuler sur un sol urbain imperméable. La quantité d'eau que les plantes peuvent extraire du sol est considérable. Une feuille peut transpirer environ 0,2 litre d'eau par jour, un arbre environ 200 litres par jour et un hectare de forêt plus de 10.000 litres par jour.⁹⁶³ La circulation de l'eau dans les plantes et les écosystèmes représente le plus grand transfert d'énergie à médiation chimique de la biosphère.
- Les arbres réduisent la croissance de l'herbe et d'autres plantes sous la canopée : la nécessité de couper l'herbe ou d'utiliser des herbicides est réduite.
- Les arbres augmentent la biodiversité car ils constituent un refuge et une source de nourriture pour la faune urbaine (par exemple, les mésanges, les rouges-gorges, les passereaux et de nombreux insectes). Des centaines d'espèces de coléoptères ont été collectées sur une seule espèce d'arbre tropical (*Luehea seemannii*), dont environ un cinquième dépend de cet arbre, qui peut atteindre 30 m de haut.⁶⁹⁹ Certaines abeilles font également leur nid dans les troncs creux des arbres à l'état sauvage.
- Les arbres ont une valeur esthétique et ornementale (par exemple, ils réduisent le contact visuel avec les immeubles d'habitation voisins). Ils améliorent la qualité des espaces urbains en termes de perception visuelle, générant des effets bénéfiques.
- Les arbres améliorent le décor et la valeur des maisons voisines.
- Les arbres améliorent la qualité des espaces urbains et sont également bénéfiques sur le plan psychologique. Il existe un lien entre le nombre d'arbres dans le lieu où l'on vit ou est traité et la santé. Pour confirmer cela, il est utile de rappeler que l'horticulture s'est avérée être une bonne thérapie pour de nombreux problèmes de santé.⁷²¹
- Les arbres ont une valeur éducative, notamment pour les enfants.

- Les arbres réduisent la pollution sonore, grâce à leur capacité naturelle d'absorption des sons ; ils peuvent même réduire de plus de 50% le bruit perçu en ville, qui est à l'origine de la gêne, des perturbations (du sommeil, par exemple) et de l'incidence accrue de certaines maladies.
- Les arbres peuvent fournir de l'énergie (combustion) : dans une grande partie de la planète, ils constituent la plus importante source d'énergie combustible.
- Les arbres fournissent des fruits importants pour la consommation humaine et des médicaments indispensables.
- Les arbres peuvent aider à prévenir les maladies des cultures. Autour des zones cultivées, il est utile de planter des espèces d'arbres qui sont attractives pour les ravageurs d'intérêt agricole. Au Brésil, il a été possible de réduire la densité d'un coléoptère ravageur des agrumes (*Cratosomus flavofasciatus*) en plantant un petit arbre (*Cordia verbenacea*) à une distance de 100-150 m des champs cultivés.
Certaines plantes peuvent favoriser la répulsion des ravageurs ou l'attraction des ennemis naturels des ravageurs de la culture : cette stratégie a été appliquée dans la culture du maïs en Afrique.
La restauration de zones semi-naturelles augmente la productivité du manguier, par exemple, d'environ 1 à 5 kg de fruits par arbre. Les cultures destinées aux apiculteurs, comme les cerises (*Prunus*), bénéficient de la présence de zones semi-naturelles qui offrent des zones de refuge aux insectes pollinisateurs sauvages. Augmenter de 20 à 50% la proportion de la surface occupée par des espèces sauvages ou des milieux semi-naturels (dans un rayon de moins de 1 km) permet d'augmenter la production de cerises de 150%, indépendamment de la densité des colonies d'abeilles domestiques.⁶¹⁶
- Les arbres rendent l'activité physique agréable et contribuent à réduire le risque d'obésité et d'autres maladies liées au mode de vie, comme le diabète. Les personnes vivant à plus d'un kilomètre d'un espace vert signalent davantage de problèmes de santé que celles qui vivent plus près.
- Les arbres réduisent le stress. Le contact avec la nature régénère le corps et réduit le stress, à tel point que même une courte pause de travail passée dans un espace vert apporte des bénéfices au bien-être physique et mental : marcher parmi les arbres réduit le stress avec des effets physiologiques qui peuvent être mesurés après 15 minutes.⁹⁶⁵ Vivre au contact de la nature améliore notre créativité jusqu'à 50%.⁹⁶⁶
- Les arbres aident les jeunes à grandir. La fréquentation des infrastructures vertes par les enfants (8-10 ans) améliore sensiblement leur capacité d'attention, ce qui amène à considérer les implications pour la politique d'éducation et la conception des zones scolaires.⁹⁶⁷
- Les arbres favorisent la cohésion sociale : le partage des espaces verts publics encourage les gens à s'impliquer, notamment par le biais d'organisations bénévoles. Les relations sociales sont renforcées et un fort sentiment de communauté est encouragé, ce qui permet de réduire l'isolement et la marginalisation.

- Les arbres et les espaces verts ont une valeur récréative et sanitaire considérable. À l'heure où les enfants vivent en ville, les activités solitaires (souvent devant un écran) et les activités structurées (encadrées de manière rigide par les parents) prennent de plus en plus le dessus, au détriment du jeu libre et du temps passé en liberté. Les espaces naturels se font de plus en plus rares, tandis que les stimuli anormaux et préconçus sont en augmentation. Ces stimuli sont souvent absorbés de manière passive et non critique à travers un écran. Dans ce contexte, les outils numériques, qui permettent d'une part d'acquérir et de partager des informations à un niveau sans précédent, induisent un mode de vie sédentaire et une déconnexion du monde réel. Augmenter la disponibilité des espaces ouverts peut contribuer à améliorer des facteurs importants pour l'équilibre physique, mental et le développement.

Les arbres peuvent avoir une très longue durée de vie, même plus de 3.000 ans, comme c'est le cas des séquoias géants en Amérique du Nord, de sorte qu'ils peuvent fournir des services très utiles et gratuits pendant des millénaires. Certaines plantes sont capables de survivre dans des conditions de sécheresse extrême, comme celle du désert de Namibie où il pleut moins de 19 mm d'eau par an (en Italie, entre 700 et 900 mm par an). Les plantes adaptées à ces conditions extrêmes sont capables d'accumuler de l'eau pendant les courtes périodes où elle est présente ou sont capables d'en extraire du brouillard : même l'équivalent de 35 mm de pluie en un an. Par exemple, une herbe de 2 m de haut (*Stipagrostis sabulicola*) est capable de recueillir 5 L d'eau de l'air pour chaque mètre carré de feuilles.⁹⁸⁶

Les arbres sont une ressource sociale et améliorent la qualité de vie. Une phrase attribuée à un chef de tribu amérindien, Sitting Bull, peut nous aider à y réfléchir.

"Quand vous aurez coupé le dernier arbre, quand vous aurez pêché le dernier poisson, quand vous aurez pollué la dernière rivière, alors vous réaliserez que vous ne pouvez pas manger d'argent."

Les données suivantes permettent de mesurer les bénéfices générés par les espaces verts publics. Il a été estimé que les 692.892 arbres recensés dans la ville de New York (aux États-Unis d'Amérique) produisent les bénéfices économiques suivants :⁹⁶⁸

- l'élimination du dioxyde de carbone de l'atmosphère génère un bénéfice de plus de 4 millions de dollars ;
- l'élimination des polluants atmosphériques génère un avantage économique de plus de 6,5 millions de dollars ;
- l'absorption de l'eau de pluie génère un bénéfice économique d'environ 10,6 millions de dollars.

Dans l'ensemble de la ville de New York, certains des avantages environnementaux générés par la présence d'un peu moins de 700.000 arbres sont estimés à plus de cent millions de dollars : 140 dollars par arbre et par an.⁹⁶⁸ Il est probable que pour chaque euro investi dans les arbres (plantation et entretien) en ville, les bénéfices économiques, en termes de services écosystémiques, sont estimés entre quatre et six fois ce montant.⁹⁶⁹ Un élagage dramatique (par exemple, une réduction de 50% de la couronne) diminue considérablement ces avantages.

Les effets positifs des arbres sur la santé humaine aux États-Unis d'Amérique sont estimés à 6,8 milliards de dollars (fourchette : 1,5 à 13 milliards de dollars). Il convient de remarquer que, parmi les avantages estimés, figure la prévention de deux cent mille jours d'école perdus.⁹⁷⁰

À l'appui de cette affirmation, il est important de souligner que la législation nationale italienne impose à la municipalité de planter un arbre pour chaque nouveau-né. En outre, les règlements de verdissement de nombreuses municipalités stipulent qu'un nouvel arbre doit être planté pour remplacer chaque arbre abattu. Si nous imaginions que les *arbres fournissaient du wifi (internet) gratuit, nous en planterions probablement partout comme des fous. Il est dommage qu'ils ne fournissent que l'oxygène que nous respirons.*

Parmi les objectifs ambitieux mais réalisables de la Communauté européenne, on peut citer :

"...l'UE doit augmenter la taille de ses forêts, améliorer leur qualité et les rendre plus résilientes, notamment face aux incendies, à la sécheresse, aux ravageurs, aux maladies et aux autres menaces qui deviennent plus imminentes avec le changement climatique". À la lumière de ces résultats, la Commission proposera en 2021 une stratégie forestière spécifique à l'UE, conformément à nos ambitions plus larges en matière de biodiversité et de neutralité climatique. La proposition comprendra une feuille de route pour la plantation d'au moins 3 milliards d'arbres supplémentaires dans l'UE d'ici 2030, dans le plein respect des principes écologiques." ¹¹⁸²

Pour améliorer notre capacité à préserver l'environnement, il est essentiel d'impliquer les parties prenantes, telles que les plus de 50% de la population mondiale qui vivent dans des centres urbains. ¹¹⁸³ Les écosystèmes urbains doivent être régénérés dans le but de préserver l'environnement, de promouvoir la durabilité et d'améliorer la qualité de vie. Les services écosystémiques fournis par la nature sont multiples :

- la fourniture de produits (par exemple, le bois, les fibres et les aliments) ;
- la protection de la diversité génétique ;
- les services culturels (par exemple, le tourisme, les loisirs) ;
- les services essentiels à la vie (par exemple, la régulation du climat, le cycle de l'eau, la pollinisation).

Les écosystèmes urbains contribuent également au bien-être et à la résilience. La participation et l'implication des citoyens sont essentielles pour faire face aux incertitudes et aux changements à venir.

Malheureusement, les agriculteurs, qui sont les jardiniers les plus importants de la planète, n'aiment généralement pas les arbres, sauf s'ils sont directement utiles selon des critères objectifs. La conscience écologique, dans certains cas, n'apparaît que comme un bon geste cosmétique, comme les politiciens qui se font filmer en plantant un arbre. Nous avons réussi à estimer le nombre d'arbres sur la planète à environ trois trillions, mais nous sommes incapables d'arrêter la destruction de la biodiversité des forêts les plus anciennes et les plus importantes. L'illusion de la toute-puissance nous éloigne de la nature et nous laisse croire que si nous la détruisons, nous pouvons d'une manière ou d'une autre nous rattraper.

NOUS SOMMES ENTRÉS DANS L'ÈRE DE LA SOLITUDE

On estime qu'il y a entre 2 et 100 millions d'espèces vivantes sur la planète : il y a peut-être plus de 8 millions d'espèces eucaryotes à elles seules. Il y en a probablement beaucoup plus : les espèces bactériennes à elles seules pourraient se compter en milliards. Nous avons donc classé très peu de micro-organismes procaryotes, peut-être moins de 0,01%. Pour 99% des espèces découvertes (moins de 3% de celles qui existent probablement), nous savons où elles

ont été trouvées, on leur a donné des noms, quelques spécimens sont conservés dans un musée et certaines descriptions anatomiques ont été publiées dans des revues scientifiques. ⁶³⁹

Personne ne sait exactement combien d'espèces animales et végétales différentes existent sur la planète, mais tout le monde peut facilement mesurer le rythme auquel les écosystèmes sont détruits et la biodiversité réduite. De la préhistoire à nos jours, les principales causes d'extinction et, partant, de réduction de la biodiversité, ont été les suivantes :

- la chasse ;
- la destruction des écosystèmes (par exemple en raison de la pollution ou de la déforestation, et nous pouvons également ajouter le changement climatique généré par les activités humaines) ;
- l'introduction d'animaux étrangers (par exemple, des rats et des chèvres) ;
- les maladies et les problèmes générés par les "étrangers" transplantés.

Après le risque d'une guerre planétaire avec des armes de destruction massive, la réduction de la biodiversité, le changement climatique et la dégradation des sols fertiles sont les menaces environnementales les plus graves auxquelles l'humanité est confrontée.

Les activités humaines ont altéré au moins 75% de la surface de la terre et 85% des zones humides (par exemple, les marais) ont été détruites. ³³⁹ Depuis 1870, plus de 50% des récifs coralliens ont été détruits ou altérés de manière irréversible et le taux de dégradation augmente.

³³⁹ Les récifs coralliens occupent moins de 0,1% de la surface de la mer (qui occupe 70% de la surface de la planète) mais sont essentiels pour au moins 25% de toutes les espèces de poissons marins ; malheureusement, les trois quarts des récifs coralliens sont aujourd'hui menacés. ³⁴⁵

Parmi les services rendus par les écosystèmes marins et terrestres figure l'atténuation des effets du changement climatique, car ils séquestrent plusieurs milliards de tonnes de carbone chaque année (au moins 5,6 Gt ou giga-tonnes). ³³⁹ Les services de la nature sont essentiels pour atteindre les objectifs de durabilité environnementale des Nations unies, résumés en 17 thèmes stratégiques, afin d'éviter l'effondrement. ³⁴⁰

La perte de biodiversité au cours des 50 dernières années est sans précédent dans l'histoire de l'humanité : les espèces disparaissent à un rythme cent à mille fois supérieur au rythme naturel. Malgré la prise de conscience de la gravité de la situation, le rythme de disparition de milliers d'espèces s'accélère. ²⁷⁷ Aucune créature n'a jamais modifié la vie sur la planète de cette façon. Après les grandes extinctions du passé, on a découvert qu'il fallait tellement de temps, des millions d'années, pour régénérer la biodiversité que l'on ne s'intéressait pas à ce que l'on pouvait attendre des humains. Au moins cinq extinctions massives majeures ont eu lieu dans le passé. La première s'est produite il y a environ 450 millions d'années, lorsque la plupart des formes de vie étaient aquatiques. La plus grave s'est probablement produite il y a 250 millions d'années, et la plus célèbre a entraîné l'extinction des dinosaures il y a environ 65 millions d'années. Toutefois, ces cinq événements se sont produits sur une période de plusieurs centaines de millions d'années et peuvent donc être considérés comme extrêmement rares.

L'étude des fossiles du passé a permis d'estimer le taux d'extinction naturelle, c'est-à-dire la vitesse à laquelle les espèces s'éteignent en l'absence de domination de la nature par l'homme. Pour les mammifères (il existe environ 5.500 espèces classées), probablement le groupe le mieux étudié, le taux d'extinction sous-jacent pourrait être d'une espèce tous les cent ans. ⁶⁹⁹ Une espèce d'amphibiens aurait pu s'éteindre environ tous les mille ans. Ces données suggèrent que pendant la vie d'un être humain, l'extinction d'un animal aurait été très improbable. Malheureusement, comme nous le savons aujourd'hui, ce n'est plus le cas : les amphibiens figurent parmi les animaux les plus menacés, avec un taux d'extinction quarante-cinq mille fois plus élevé que celui prévu naturellement.

Autrefois, au cours de l'existence d'un être humain, il aurait été impossible d'enregistrer la génération d'une nouvelle espèce, alors que grâce à l'ingéniosité et à la biotechnologie, la

création de nouveaux êtres vivants peut avoir lieu très rapidement. Des micro-organismes génétiquement modifiés qui n'existent pas dans la nature peuvent être conçus et générés en laboratoire en quelques jours. Pour les animaux et les plantes, quelques mois ou années peuvent suffire. Cette augmentation de la vitesse de création et de diffusion sur la planète d'espèces créées par le génie humain grâce à la biotechnologie est donc également sans précédent. La manipulation de la biodiversité génétique est une source d'inquiétude car elle permet d'utiliser des applications potentiellement horribles pour satisfaire des objectifs de guerre ou de domination économique.

L'écosystème planétaire glisse de manière irréversible vers un nouvel état en raison de facteurs anthropogéniques, avec des effets dramatiques et partiellement inconnus. La manipulation continue de la structure de la composition végétale de la planète est destructrice. Malheureusement, à mesure que le nombre d'espèces qui disparaissent ou sont en voie d'extinction augmente, le rythme d'extinction des survivants s'accélère.⁶⁹³ La réduction d'une espèce au-delà d'un certain seuil de sécurité, appelé *population minimale viable*, conduit à son extinction en raison de divers facteurs, tels que l'appauvrissement génétique et l'incapacité à s'adapter à de nouveaux facteurs environnementaux ; comme c'est le cas dans les zoos qui abritent les derniers spécimens survivants de certaines espèces animales, qui n'existent plus dans la nature, parce que leurs écosystèmes ont été irréversiblement modifiés, par exemple par l'agriculture. Le phénomène est encore plus rapide lorsque des écosystèmes entiers sont détruits. À mesure que les extinctions augmentent, la biodiversité atteint un point critique et l'écosystème s'effondre. Malheureusement, nous ne savons pas quels sont les seuils de réduction de la biodiversité que les écosystèmes, tels que les écosystèmes agricoles, peuvent supporter avant que la catastrophe ne survienne. Nous pouvons raisonnablement supposer qu'au rythme actuel de destruction de la biodiversité, nous sommes entrés dans une nouvelle ère que l'on peut appeler l'*Eremocène* ou *ère de la solitude*, c'est-à-dire une ère dans laquelle l'espèce humaine et les quelques espèces domestiquées dominent la biosphère. Pour autant que nous le sachions, une époque répondant à ces exigences ne peut pas durer longtemps. Elle pourrait donc s'avérer être l'une des périodes les plus courtes de l'histoire de l'humanité.

Des institutions telles que celles de la Communauté européenne soulignent également l'importance de la sauvegarde de la biodiversité : ¹¹⁸²

"... La protection de la biodiversité a des justifications économiques incontournables. Les gènes, les espèces et les services écosystémiques sont des intrants indispensables pour l'industrie et les entreprises, notamment pour la production de médicaments... Le rapport global avantages/coûts d'un programme mondial efficace de conservation de la nature encore à l'état sauvage est estimé à au moins 100 pour 1."

Personne ne sait exactement combien d'espèces il y a sur la planète, et pour la plupart de celles qui sont connues, très peu d'informations sont disponibles. En 2015, le nombre d'espèces classées a dépassé les deux millions, dont 32.000 espèces de poissons, 10.000 espèces d'oiseaux et au moins 5.500 espèces de mammifères.^{693, 962} En outre, au moins 270.000 espèces de plantes et 900.000 espèces d'insectes ont été classées. Ces données montrent que pour chaque espèce dotée de poils et de glandes mammaires, il existe au moins 160 espèces dotées d'antennes composées et d'yeux, bien qu'il y ait probablement plus d'insectes à découvrir que d'espèces classées, et plus de mammifères à découvrir.

Si nous supposons que le taux d'extinction général actuel se situe entre 0,1% et 0,01%, c'est-à-dire qu'il est très faible, et si nous supposons qu'il existe au moins 2 millions d'êtres vivants autres que les humains, cela signifie qu'entre 200 et 2.000 espèces disparaissent de manière irréversible chaque année. Si, par contre, nous supposons qu'il y a 100 millions d'espèces

présentes, au même rythme d'extinction, nous éliminons de la planète entre 10.000 et 100.000 espèces par an. Certaines estimations chiffrent le taux d'extinction à 150 espèces par jour. Le taux d'extinction peut varier considérablement ; par exemple, la disparition des formes de vie dans les eaux douces est au moins 4 à 6 fois plus rapide que sur terre.⁵ Les rapports scientifiques recommandent que le taux de perte de biodiversité ne dépasse pas 10 espèces par million d'espèces et par an. Le taux d'extinction actuel est donc au moins 100 fois supérieur à ce seuil.

L'histoire géologique nous a appris que nous sommes l'espèce la plus destructrice de l'histoire de la vie. Jusqu'à l'arrivée de l'homme il y a environ 200.000 ans, les experts estiment que le taux d'extinction se situait entre une et dix espèces disparues par million d'espèces et par an.⁶⁹³

Aujourd'hui, ce taux d'extinction a été multiplié en moyenne par 100 à 1.000, mais dans certains écosystèmes, il est encore plus élevé : entre 3 et 40 espèces disparaissent chaque jour. Malheureusement, le rythme de disparition des êtres vivants ne cesse de s'accélérer. Une perte aussi rapide d'un si grand nombre d'espèces devrait désespérer tout le monde, et pas seulement les défenseurs de la nature, car elle génère d'énormes dommages économiques dus à la perte de fonctionnalité des écosystèmes.

Quel pourcentage des survivants actuels arrivera à la fin de ce siècle ? Personne ne peut prédire exactement ce qui se passera dans le futur, mais au rythme actuel d'extinction, probablement la moitié ou moins d'un quart des espèces connues aujourd'hui auront survécu à la fin du siècle. Combien de temps pouvons-nous continuer à ne pas prendre cette catastrophe au sérieux sans en subir les conséquences désastreuses ? L'extinction massive que l'humanité est en train de provoquer, et avec elle l'extinction des écosystèmes et des gènes, est, avec les guerres mondiales, les pandémies et le changement climatique, l'une des menaces les plus mortelles que l'humanité se soit jamais imposée. Nous conduisons l'*Anthropocène* vers l'*Eremocène*, l'ère pendant laquelle, pendant une très courte période, il nous restera les quelques espèces domestiquées à des fins égoïstes. Ce sera une ère très courte car elle précède l'effondrement. Surmonter ce goulot d'étranglement qui ne cesse de se réduire est devenu un impératif, notamment parce qu'il est vraiment difficile d'espérer la paix et la santé pour la population mondiale qui, à la fin de ce siècle, pourrait compter entre 10 et 12 milliards d'individus. La partie finale sur le sort de la biodiversité se jouera dans les prochaines années, probablement en moins de temps qu'une génération humaine.

La science qui étudie les interactions entre les organismes dans un écosystème ou dans l'ensemble de la biosphère est encore très jeune. Les connaissances sur ces questions étant très rares, nous ne sommes pas en mesure de donner des réponses décisives, et il ne reste plus qu'à interrompre la pression négative sur l'environnement. Pour l'instant, cette hypothèse est utopique. Il y a probablement une espèce sauvage sur la planète pour 1.000 à 2.000 êtres humains (sans compter les espèces inconnues et les micro-organismes, qui peuvent être numériquement plus importants que ceux classés) et, par conséquent, on peut supposer qu'il faut trouver des parrainages pour les protéger. Pour atteindre un équilibre dans la sauvegarde de la biodiversité nécessaire à la survie de l'espèce humaine, il faudrait probablement consacrer la majeure partie de la surface de la planète aux espèces sauvages.

Malgré le fait que ce que l'on peut appeler la sixième extinction de masse soit en cours, puisqu'au moins cinq autres ont été enregistrées, nous continuons à découvrir de nouvelles espèces. Chaque année, au moins 13.000 nouvelles espèces supplémentaires sont décrites sur la planète : 130 - 160 espèces de poissons, 25 - 30 de mammifères terrestres, 6 - 7 d'oiseaux.⁵

CERTAINES CAUSES D'EXTINCTION DES ESPÈCES NON HUMAINES

Parmi les principales causes de la réduction de la biodiversité, il convient de mentionner:

- La destruction des écosystèmes naturels : l'agriculture en est l'une des principales causes.
- La propagation des espèces exotiques, c'est-à-dire l'introduction d'espèces non indigènes.
- La pollution de l'air, de l'eau et du sol. L'utilisation massive de médicaments contribue à porter atteinte à la biodiversité : on a découvert que le vautour du Bengale (*Gyps bengalensis*) en Inde était tué par un anti-inflammatoire largement utilisé en médecine et en médecine vétérinaire, en raison de l'exposition à l'ingrédient actif présent dans les cadavres de bovins (il s'agissait du diclofénac, un anti-inflammatoire analgésique non stéroïdien ; ce médicament se trouve facilement dans l'eau des rivières de la planète à des concentrations élevées).^{978, 979}
- La croissance démographique (thème très impopulaire mais probablement bien présent dans les stratégies de survie élaborées par les puissances guerrières et qui est en même temps très angoissant).
- La surexploitation, comme la chasse et la pêche.
- Le commerce illégal et légal : il y a plus de tigres en captivité aux États-Unis qu'en liberté dans le reste du monde (en Europe, on peut manger dans des restaurants proposant des steaks de zèbre, des saucisses de crocodile, des boulettes de viande de marsupial, des chameaux et des pythons).¹²⁷⁶
- Le changement climatique.
- La perte de la fertilité des sols.

Selon certains chercheurs, ce sont les principales causes de la réduction irréversible de la biodiversité. Voici quelques détails pour comprendre la gravité de la situation : au moins 393 plantes aquatiques ont été classées en Europe (270 vivent également en Italie), dont 63 sont endémiques. Les principales causes d'extinction des plantes aquatiques sont, par ordre décroissant, les suivantes :

- la modification irréversible des écosystèmes (par exemple, le drainage des zones humides) et la surconstruction (par exemple, le tourisme, l'étalement urbain) ;
- la pollution des eaux causée par l'agriculture ;
- l'agriculture intensive ;
- l'agriculture intensive ;
- la pollution des eaux due aux rejets civils et industriels.

Il est triste de constater que les incendies figurent parmi les principales causes de destruction de la biodiversité. Pour la seule année 2000, plus de 350 millions d'hectares ont brûlé. La fréquence des incendies augmente avec le changement climatique, bien que la plupart soient le résultat d'intérêts commerciaux. Nos ancêtres ont probablement utilisé délibérément le feu, pour un usage autre que la cuisson de la viande et des légumes, il y a plus de 160.000 ans.⁷⁰³ Le pollen et le charbon de bois indiquent que les habitants de la Colombie ont utilisé la culture sur brûlis il y a 5.000 ans pour permettre la culture du maïs et du manioc dans les zones forestières. L'ancienne technique du brûlis est encore utilisée par plus de 300 millions d'agriculteurs en Afrique ou en Amérique centrale. Des feux sont également allumés par les agriculteurs italiens, par exemple pour brûler le chaume et la paille, bien que ce type d'intervention soit interdit car il nuit au sol et à l'atmosphère et, par conséquent, à notre santé. Au cours de l'évolution, de

nombreuses plantes ont appris à vivre avec les feux, au point que certaines, dans certaines conditions, en tirent profit.

Diverses études montrent qu'au fil des ans, l'abondance des espèces a diminué en raison des changements causés par l'homme. En Angleterre, les changements d'affectation des sols survenus au cours des 80 dernières années ont également eu des effets négatifs sur les abeilles et les guêpes.⁴⁷² L'abondance des abeilles et des guêpes a diminué dans 75% des sites étudiés. La réduction de l'abondance et de la biodiversité est influencée par l'expansion des cultures et des pratiques telles que le labourage, l'utilisation d'insecticides et d'herbicides. L'extension des monocultures, souvent en monoculture, réduit la présence des pollinisateurs sauvages. Cette réduction peut être partiellement compensée par l'augmentation de la biodiversité. La conservation des zones naturelles proches des terres cultivées profite à ces dernières. L'accroissement de la biodiversité dans les zones agricoles a apporté des avantages économiques grâce à l'amélioration des services de pollinisation pour les cultures suivantes : cerises, fraises, haricots et colza.⁴⁷²

La biodiversité des sols est détruite par l'utilisation de pesticides. Les micro-organismes fixateurs d'azote, tels que ceux qui vivent en symbiose avec certaines plantes comme les légumineuses, sont endommagés par les pesticides. Un effet négatif conséquent est la réduction des récoltes en raison de la diminution de la fertilité du sol.

Des études montrent que le changement climatique en Europe pourrait entraîner une réduction du nombre d'espèces comprise entre 27% et 42% d'ici 2080. La nature est notre meilleur allié pour résoudre cette urgence. Une espèce ne peut prospérer que si toutes les autres sont en bonne santé ; nous devons adhérer à ce principe. Il ne s'agit pas de sauver la planète mais nous-mêmes. La nature retrouvera notre espace après l'effondrement. Lorsqu'on essaie d'imaginer le futur en regardant le passé, on peut imaginer ce qui restera du présent. Tout ce que nous comptons parmi les grandes œuvres de notre espèce sera, dans des millions d'années, comprimé dans une couche de sédiments pouvant avoir moins d'un centimètre d'épaisseur.

PARADIS PERDUS : DÉFORESTATION ET BIODIVERSITÉ

On estime que les forêts occupent environ 30% de la surface terrestre (la plupart sont des forêts tropicales, suivies des forêts boréales puis des forêts tempérées), mais elles abritent au moins 80% de toutes les espèces terrestres. Les forêts tropicales n'occupent à elles seules qu'une faible proportion de la surface de la Terre (probablement 6%) mais contiennent plus de 70% des espèces connues. La plupart des forêts de la planète se trouvent dans cinq États : Russie, Brésil, Canada, États-Unis et Chine.³⁶

En 2018, un tiers de la population mondiale utilisait le bois comme principale source d'énergie pour cuisiner et se chauffer. Les forêts fournissent environ 40% de l'énergie renouvelable consommée sur la planète sous forme de combustibles ligneux, soit autant que les énergies hydraulique, solaire et éolienne réunies.⁹⁷⁷

Globalement, il y avait environ 5 milliards d'hectares de forêts en 1900 ; cette superficie a été réduite à moins de 4 milliards d'hectares en 2010. Ainsi, la superficie forestière mondiale estimée est d'environ 4 milliards d'hectares, ce qui, comparé aux estimations de la population de 2010, donne une disponibilité d'environ 0,6 ha de forêt par personne. Mais si l'on ne considère que les forêts primaires, c'est-à-dire celles qui n'ont jamais été coupées par l'homme et où il n'y a pas de signes de dégradation due aux activités humaines, le pourcentage diminue considérablement car seulement 36% de la superficie forestière est aujourd'hui considérée comme une forêt primaire : plus de 40 millions d'hectares ont été perdus au cours des dix dernières années.

Entre 1990 et 2000, la perte de superficie forestière mondiale a été en moyenne d'environ 8,3 millions d'hectares par an, soit une superficie presque équivalente aux terres agricoles de l'Italie.¹⁵ La déforestation de la planète se poursuit à un rythme d'environ 4.000 mètres carrés par seconde.²⁸ Chaque année, une surface forestière équivalente à deux tiers de la superficie de l'Italie (200.000 km², soit 20.000.000 d'hectares) est détruite.¹⁰ Selon d'autres estimations plus optimistes, la déforestation se poursuit au rythme de 13.000.000 d'hectares par an, ce qui signifie qu'au moins 1% des forêts de la planète disparaissent chaque année.³⁷ Pour construire et maintenir la biodiversité, la taille d'une zone est très importante. Les scientifiques estiment que lorsque la taille d'une zone est multipliée par dix, le nombre d'espèces peut doubler.⁶³⁹

La déforestation a entraîné une perte grave et irréversible de la biodiversité et une augmentation de la désertification. Dans les zones de la planète encore couvertes de forêts, les choix déjà faits dans d'autres pays se répètent, comme la déforestation de l'Europe, qui était autrefois entièrement boisée. Chaque territoire est différent, par exemple, en Nouvelle-Guinée, 80% des 21.000 espèces végétales recensées sont endémiques, de sorte que la destruction de petites zones suffit à générer une grande perte de biodiversité.

Malheureusement, il n'existe pas de définition univoque d'une forêt ou d'une zone couverte par une forêt. Quel doit être le couvert végétal minimum ? Selon certaines interprétations 10%, selon d'autres 20%.⁷ Le reboisement ne peut être considéré comme équivalent à une forêt qui n'a jamais été endommagée par l'homme, c'est pourquoi les données sur le niveau de boisement doivent également fournir d'autres informations. C'est l'une des raisons pour lesquelles on peut trouver des estimations très différentes. L'Amérique du Sud et l'Afrique ont enregistré (2000-2010) le plus fort taux de perte de superficie forestière, tandis qu'en Europe, la superficie couverte par la forêt a augmenté ; mais il est triste de découvrir que, dans certains cas, cela est la conséquence du fait qu'il est rentable d'importer du bois des tropiques.

La fraction des forêts naturelles (non artificielles) qui sont remplacées, dans certains cas, par des forêts artificielles, souvent composées d'espèces non indigènes, continue de diminuer très rapidement et de manière irréversible.

La végétation et les sols des forêts constituent, après les océans, le plus grand réservoir de carbone. Nous détruisons au moins 12 à 15 millions d'hectares par an, ce qui représente probablement plus de 20% des émissions mondiales de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. La biomasse forestière à elle seule contient probablement 289 Gt de carbone.¹⁵ Si aucune mesure n'est prise maintenant et que les tendances actuelles se poursuivent, plus de 230 millions d'hectares de forêts disparaîtront avant 2050.

Un objectif ambitieux est fixé :

"D'ici 2020, au moins 17% des zones terrestres et des eaux intérieures et 10% des zones marines et côtières, en particulier les zones revêtant une importance particulière pour la biodiversité et les services environnementaux, seront conservées, grâce à la gestion efficace et équitable d'un système d'aires protégées écologiquement représentatif et bien relié, avec d'autres mesures efficaces de conservation à l'échelle de la zone et intégré à des paysages terrestres et marins plus vastes" ; (10e Conférence des Parties à la Convention tenue en 2010 à Aichi-Nagoya, Japon).

Du point de vue des autres espèces vivantes, un tribunal des droits de la nature nous classerait parmi les pires criminels environnementaux ayant jamais existé sur Terre : des tueurs super-efficaces et myopes capables d'éliminer des espèces à un rythme sans précédent et, au cours des 10.000 dernières années, en pleine accélération. En conclusion, on peut prédire de manière réaliste que les enfants d'aujourd'hui, une fois adultes, ne pourront pas visiter les plus importantes zones sauvages restantes, car elles auront disparu. Nous avons besoin de sagesse,

nous sommes la seule espèce capable d'imaginer notre avenir. Nous devons construire la maison parfaite.

LA BIODIVERSITÉ DES INSECTES EN DÉCLIN

Au niveau mondial, au moins 41% des espèces d'insectes sont en déclin et 2,5% de la biomasse est perdue chaque année.³⁴⁴ En Europe, 44% et aux États-Unis 51% des espèces d'insectes sont en déclin rapide. Si l'homme disparaissait soudainement, la Terre redeviendrait probablement ce qu'elle était il y a plusieurs milliers d'années, mais si les insectes disparaissaient, la biosphère s'effondrerait. Selon la liste rouge de l'Union internationale pour la conservation de la nature, 9% des abeilles et des papillons d'Europe sont menacés. Après les coléoptères, les papillons et les mites (papillons de nuit) constituent la plus grande famille d'insectes, avec au moins 200.000 espèces classées. On a constaté que les fleurs visitées par les papillons contiennent plus de nectar que de pollen et que celles visitées par les mites s'ouvrent la nuit, lorsque ces insectes sont les plus actifs.⁸⁶⁹

En 2017, une enquête menée sur 27 ans (1989-2016) en Allemagne a enregistré une réduction de 76,7% de la biomasse des insectes volants : un suivi a été effectué dans 63 zones de conservation de la nature.^{344, 346} La plus grande réduction a été enregistrée pendant l'été : 82%. Quatre-vingt-quatorze pour cent des points de piégeage des insectes étaient situés près des zones cultivées. Ce taux de réduction est supérieur à celui enregistré pour les vertébrés sauvages au cours des 42 années jusqu'en 2012, qui était de 58% (abondance totale).³⁴⁶ Au cours des dernières décennies, les articles scientifiques font état d'un taux annuel de réduction des insectes et des arthropodes en général compris entre 2,2 et 2,8% par an, l'environnement artificiel de l'agriculture chimique étant la cause la plus importante de cette réduction alarmante.

Une étude a mesuré la biomasse des insectes capturés à l'aide du même système entre 1989 et 2013 dans une réserve naturelle du nord-est de l'Allemagne.²⁷⁸ En 24 ans, la biomasse des insectes capturés a diminué de 78%. Les pièges utilisés recueillaient principalement des insectes volants. En 1989, les pièges avaient permis de collecter 17.291 insectes volants appartenant à 143 espèces mais, sur le même site et selon la même méthode, 2.737 individus appartenant à 104 espèces ont été capturés en 2014.²⁷⁸ Un résultat similaire a été obtenu dans le sud de l'Écosse. Entre 1970 et 2002, la biomasse des individus capturés dans les pièges écossais a diminué de plus de deux tiers.²⁷⁸

Entre 1989 et 2013, dans certaines régions d'Europe, les pesticides et le changement d'affectation des sols ont été responsables de la disparition de 78% des insectes et de 86% des pollinisateurs tels que les abeilles.²⁷⁶ Parmi les facteurs qui contribuent au déclin de certains animaux tels que les insectes pollinisateurs, on peut citer l'utilisation d'herbicides, car ils réduisent la possibilité de se nourrir.⁴⁸³ Ces molécules, ainsi que d'autres catégories de pesticides comme les fongicides, ont des effets nocifs sur les insectes même si elles ne sont apparemment pas conçues pour les tuer (contrairement aux insecticides).

Le déclin des insectes volants s'accompagne de la disparition d'autres animaux tels que les oiseaux et les reptiles. Entre 1970 et 2012, la population mondiale d'oiseaux, de poissons, de mammifères et d'amphibiens a diminué de 58%. L'estimation a été obtenue en suivant 3.706 espèces de vertébrés appartenant à 14.152 populations et confirme une réduction moyenne d'environ 2% par an.³⁴⁵ Le taux de déclin est plus faible dans les écosystèmes terrestres (1,1% par an) et plus élevé dans les écosystèmes d'eau douce (3,9% par an).

En Grande-Bretagne, entre 1980 et 2013, une forte réduction de l'abondance de 353 espèces d'insectes volants a été enregistrée.³⁴⁸ Les insectes pollinisateurs sauvages, sur 33 ans, ont connu une réduction de 33% : en montagne, une diminution de 52% a été observée. À

chaque point de surveillance (1 km²), environ 11 espèces ont disparu en 33 ans, dont 4 abeilles sauvages.³⁴⁸

59 espèces de papillons ont été classées en Grande-Bretagne et plus de 400 en Europe, dont au moins un tiers sont définitivement en déclin.⁸⁴⁸ Dans les prairies européennes, entre 1990 et 2011, l'abondance des papillons a diminué de 50%.³⁴⁶ Le suivi de l'abondance de 17 espèces de papillons de prairie, réalisé entre 1990 et 2017 dans 16 pays européens, montre une réduction pour 6 espèces (35%).³⁴⁷ En Europe, sur 27 ans, l'abondance des papillons a diminué en moyenne de 39%, ce qui met en évidence un déclin spectaculaire de la biodiversité ; dans certaines régions d'Europe, la réduction a été beaucoup plus importante.³⁴⁷ En Angleterre, l'abondance des papillons dans les zones agricoles a diminué de 58% entre 2000 et 2009, alors que les dépenses consacrées à la protection de la nature ont doublé et que le changement climatique aurait dû entraîner une augmentation.³⁵³ Selon les auteurs, l'un des facteurs contribuant à la diminution du nombre de papillons est la présence d'insecticides néonicotinoïdes (pour 15 des 17 espèces de papillons étudiées).³⁵³

Les États-Unis affichent également des taux de réduction effroyables : 80% pour le papillon monarque (*Danaus plexippus*) entre 1985 et 2017.³⁵⁰ L'une des causes de la diminution du nombre de papillons monarques et d'autres papillons en Amérique du Nord est l'utilisation d'insecticides tels que les néonicotinoïdes.^{351, 352} De nombreux pesticides ont des effets sublétaux sur le métabolisme, la reproduction (ils peuvent agir comme des analogues hormonaux) et le comportement (par exemple, les néonicotinoïdes) des papillons, tout comme pour les abeilles.⁵⁸⁴

En ce qui concerne les papillons (insectes lépidoptères), il convient de rappeler qu'ils sont des pollinisateurs utiles et peuvent être utilisés comme indicateurs de la santé environnementale. En même temps, il convient de souligner que la plupart des ravageurs des cultures sont probablement des papillons, principalement des papillons de nuit.

Les insecticides simplifient les écosystèmes en réduisant leur biodiversité. En Europe, le papillon de nuit tant redouté dans la culture du maïs (la pyrale) a été favorisé par l'utilisation d'insecticides tels que l'imidaclopride, car il a fait disparaître ses ennemis naturels.⁶⁸²

Un nombre croissant de publications montrent que l'utilisation de semences traitées avec des insecticides (par exemple des néonicotinoïdes) n'augmente pas les rendements et nuit aux insectes utiles tels que les coccinelles. Les coléoptères insectivores, tels que *Hippodamia undecimnotata*, sont endommagés par des doses sublétales d'imidacloprid et de carbofuran (réduisant leur fécondité).⁶⁸² *Adalia bipunctata* est également endommagée par des doses sublétales de néonicotinoïdes.⁶⁷⁹ La coccinelle *Adalia bipunctata*¹ est utilisée dans la lutte biologique. Une situation paradoxale est que, dans certains contextes, il est devenu difficile pour les agriculteurs d'acheter des semences, telles que les semences de maïs, qui n'ont pas été traitées avec des pesticides tels que les insecticides (par exemple, les néonicotinoïdes), comme cela s'est produit en Italie.⁶⁸²

¹ Dans certaines populations d'*Adalia bipunctata* (coccinelle), la majorité des coléoptères sont des femelles.⁶⁷⁹ Dans ces populations, 80 à 90% des descendants d'une femelle sont des femelles. La cause de cette anomalie est la présence de bactéries symbiotiques qui vivent à l'intérieur des gamètes des coléoptères femelles. La bactérie est trop grosse pour vivre dans les gamètes mâles (spermatozoïdes). Elle ne peut donc être transmise à la génération suivante que par les gamètes femelles. Lorsque ces bactéries se retrouvent dans un mâle, elles meurent en même temps que l'insecte. Par conséquent, les bactéries tuent la plupart des embryons mâles nouvellement pondus. Les embryons mâles morts deviennent la nourriture de leurs sœurs lorsqu'elles sortent des œufs. Ce comportement reproducteur caractéristique est déterminé par différentes bactéries (*Wolbachia*, *Rickettsia*, *Spiroplasma*), qui sont présentes jusqu'à 20% chez des femelles.

La présence continue et massive d'insecticides a favorisé l'évolution des mécanismes de résistance. L'exposition aux insectes a favorisé la sélection artificielle de mécanismes de tolérance aux pesticides chez les papillons en .⁵⁸⁴

- réduisant la perméabilité de l'organisme aux insecticides tels que les organochlorés (DDT) ;
- produisant de nouvelles molécules (par exemple, des protéines ou des lipides) capables de fixer les pesticides à l'extérieur du corps pour empêcher leur pénétration ;
- modifiant les protéines qui se lient aux neurotransmetteurs (c'est le cas de la résistance à la dieldrine générée par une modification génétique qui a favorisé la sélection de protéines réceptrices différentes).

Comme pour la résistance aux antibiotiques développée par les bactéries, l'utilisation intensive d'insecticides peut favoriser la génération de facteurs génétiques de multirésistance, c'est-à-dire la capacité à être moins endommagé par la présence simultanée de différentes matières actives. La sélection artificielle par les insecticides favorise l'émergence de superbactéries.

La chrysomèle des racines du maïs (*Diabrotica virgifera*) est un insecte d'origine américaine appartenant à l'ordre des coléoptères. ⁶⁸⁴ Les dommages sont causés à la fois par les larves et les adultes, bien que les premières causent les plus grandes pertes de rendement car elles se nourrissent du système racinaire. Plusieurs rapports font état d'insectes devenus résistants aux insecticides utilisés sur le maïs. ⁶⁸² La chrysomèle occidentale des racines du maïs peut causer de graves dommages au maïs si la culture est répétée deux ou plusieurs années de suite sur la même parcelle, de sorte que la culture alternée peut générer plus de bénéfices que l'utilisation de pesticides.

Les pesticides tels que les insecticides, mais aussi les champignons et la bactérie *Bacillus thuringiensis*, qui produit des toxines toxiques pour les larves de lépidoptères, sont utilisés pour lutter contre la prolifération des papillons qui endommagent les cultures. Depuis plusieurs années, des plantes génétiquement modifiées capables de produire elles-mêmes les toxines de la bactérie *Bacillus thuringiensis* sont cultivées afin de protéger des cultures telles que le maïs. Ces toxines se retrouvent dans le pollen et les œufs : elles peuvent générer des effets transgénérationnels. ⁵⁸⁴ Cette nouvelle stratégie biotechnologique de défense des plantes contre les ravageurs, comme les larves de mites, a conduit à l'apparition d'insectes résistants aux toxines produites par les plantes génétiquement modifiées, comme dans le cas des mites migratrices (*Helicoverpa armigera*). ⁶⁹⁴ Ces papillons s'attaquent à diverses cultures telles que la tomate, le maïs, le pois chiche, la luzerne, le tabac et surtout le cotonnier, d'où son nom commun anglo-saxon de cotton bollworm. Les larves de ce papillon nocturne peuvent se nourrir d'au moins 120 espèces végétales différentes. ⁷⁹⁶ Les toxines produites par les plantes génétiquement modifiées (celles de la bactérie *Bacillus thuringiensis*) sont également nocives pour les papillons non ciblés.

La pyrale du maïs (*Ostrinia nubilalis*) est considérée comme l'un des principaux ravageurs du maïs, mais elle s'attaque à plus de 250 espèces de plantes, dont le sorgho, les poivrons, les aubergines, les haricots, les haricots verts, les pommiers, les poiriers et certaines plantes à fleurs ornementales. ⁶⁸³ C'est un papillon nocturne extrêmement polyphage dont les larves s'enfouissent dans les tiges du maïs et d'autres plantes. Les pratiques agronomiques mises en œuvre pour le combattre comprennent l'utilisation d'insecticides (par exemple, des néonicotinoïdes dans les semences) et de variétés génétiquement modifiées pour leur capacité à produire des toxines à partir de la bactérie du sol (*Bacillus thuringiensis*). Cette toxine est active dans le tractus gastro-intestinal de certains insectes, dont l'ordre des lépidoptères (papillons), et tue donc les chenilles d'*Ostrinia* qui, se nourrissant des tissus de la plante transgénique, ingèrent la toxine. Ces semences de maïs sont appelées maïs Bt ou *Bt-corn*.

En Europe, sur les 68 espèces de bourdons recensées en 2014, 30 sont considérées comme étant en déclin et 12 menacées d'extinction. ⁴¹⁷ Ainsi, au moins 62% des espèces de

bourdons en Europe se sont révélées être en grave danger. Il est curieux que, parmi les facteurs responsables de ce déclin de la biodiversité, le changement climatique soit mis en avant mais que les pesticides soient peu mis en avant.⁴¹⁷ Au Royaume-Uni, plus de 50% des espèces de bourdons sont devenues rares ou sont en déclin.⁴¹⁸ Certains insecticides comme les néonicotinoïdes, à des doses 10 fois inférieures à celles auxquelles les insectes sont exposés avec le pollen et le nectar, réduisent la fertilité des bourdons.⁴¹⁸

En Europe, la réduction de la diversité et du nombre de bourdons (*Bombus* spp.) a été associée aux pratiques agricoles et à la perte d'écosystèmes importants pour l'alimentation et la nidification. Il convient de remarquer qu'en Angleterre, trois espèces de bourdons ont été déclarées éteintes et 22 sont menacées. Au Royaume-Uni, la plantation d'espèces végétales attirant les pollinisateurs, comme les bourdons, en bordure des cultures a entraîné une augmentation de l'occurrence d'espèces rares de bourdons (*Bombus ruderatus* et *Bombus muscorum*).⁶¹² Parmi les espèces végétales utiles à cette fonction, on trouve certaines légumineuses et des fleurs qui peuvent fournir le nectar nécessaire aux insectes (plantes annuelles ou pluriannuelles). Ainsi, pour contrer le déclin des insectes pollinisateurs tels que les bourdons, le semis de fleurs en bordure des champs cultivés peut également constituer une stratégie utile pour les agriculteurs. Le choix des plantes à semer dans les bandes de terre destinées à restaurer les zones semi-naturelles est très important, car il peut influencer des centaines de fois le nombre d'insectes.⁶¹² Dans cette étude, sur les 40 espèces semées et visitées par les bourdons pour obtenir du nectar et du pollen, quatre espèces ont représenté 92% des visites de ces insectes.⁶¹²

Un examen de l'évolution de la présence des espèces de bourdons en Amérique du Nord, réalisé en comparant les données de recensement de 1971-1973 et après 35 ans, en 2004-2006, révèle une réduction drastique tant sur le plan qualitatif que quantitatif.³⁸⁹ En 2004-2006, 11 espèces de bourdons ont été identifiées, alors qu'il y en avait 14 dans les années 1970. Sur les mêmes sites suivis après 35 ans, un déclin important est enregistré, qui souligne une réduction de la diversité mais aussi de l'abondance de 50% des espèces recensées. Plusieurs études démontrent le déclin des bourdons en Amérique du Nord : sur 20 ans, une réduction de 96% de l'abondance relative de quatre espèces de bourdons a été enregistrée, et leur aire de répartition a été réduite de 23% à 87%.^{361, 392} En plus de ce déclin, une augmentation de la prévalence des infections (par exemple le *bourdon Nosema*) et une réduction de la diversité génétique ont été enregistrées. La diminution de la variabilité génétique, ainsi que la réduction et la fragmentation des habitats, ont des conséquences délétères.

Toutes ces études confirment qu'une véritable apocalypse est en cours. Il est nécessaire de prendre conscience des limites planétaires et, en particulier, des limites physiques et biologiques. Cette extinction massive très rapide aura des répercussions très graves, car les insectes, en plus de 400 millions d'années d'évolution, ont créé, avec les plantes et les autres êtres vivants, des équilibres fondamentaux pour la survie des écosystèmes.

BIODIVERSITÉ ET SÉCURITÉ ALIMENTAIRE

De nombreux documents officiels soulignent l'importance de la biodiversité pour la sécurité alimentaire (communication de la Commission au Parlement européen, au Conseil, au Comité économique et social européen et au Comité des régions ; 2020) :¹¹⁸²

"...La biodiversité est également fondamentale pour préserver la sécurité alimentaire de l'UE et de la planète entière et son appauvrissement constitue une menace pour les systèmes alimentaires, mettant en péril notre sécurité alimentaire ainsi que notre nutrition. La biodiversité est également à la base de régimes

alimentaires sains et nutritifs et améliore à la fois les moyens de subsistance des populations rurales et la productivité agricole : plus de 75% des cultures vivrières dans le monde dépendent de la pollinisation animale. Malgré l'urgence de cet impératif moral, économique et environnemental, la nature est dans un état critique. Les cinq principales causes directes de la perte de biodiversité (changement d'affectation des terres et des mers, surexploitation des ressources, changement climatique, pollution et espèces exotiques envahissantes) sont en train d'anéantir rapidement l'environnement naturel... Au cours des 40 dernières années, la faune et la flore de la planète ont été réduites de 60% en raison des activités humaines et près des trois quarts de la surface de la terre ont été modifiés, reléguant la nature dans un coin de plus en plus étroit. "

Nous avons classé environ deux millions d'espèces, mais nous pensons qu'il en reste encore au moins huit millions à découvrir, la plupart étant des plantes, des invertébrés et des micro-organismes. On connaît plus de 270.000 espèces de plantes, mais 90% de notre alimentation est basée sur une quinzaine d'entre elles, dont le blé, le riz, le maïs, l'orge, le soja et le millet. Trois espèces, à savoir le riz, le blé et le maïs, fournissent probablement plus de 50% des calories consommées par l'espèce humaine. L'alimentation animale repose également sur quelques espèces existantes, moins de 10, dont les bovins, les ovins, les caprins, les porcins, les poulets et les canards. Actuellement, 90% de la nourriture utilisée par les humains provient de 15 espèces végétales et de 8 espèces animales (75% de 12 cultures et 5 espèces animales).⁹⁸⁵ Si l'on accepte l'estimation de l'existence d'au moins 10 millions d'autres espèces, on peut conclure que nous n'avons pu exploiter que très peu d'espèces à des fins alimentaires et qu'il existe encore un énorme potentiel. Dans l'histoire de l'humanité, on estime qu'au moins 20.000 espèces ont été utilisées pour l'alimentation et que plus de 80.000 pourraient être utilisées aujourd'hui. Malheureusement, il est probable qu'au moins la moitié des espèces qui existent aujourd'hui auront disparu au cours de ce siècle en raison des activités humaines.

Les premiers signes de domestication des plantes et des animaux sont très anciens : le blé et les moutons étaient utilisés pour l'agriculture et l'élevage en Orient il y a déjà 10500 ans. Dans la vallée de l'Indus, on trouve des traces de domestication du bétail remontant à 9000 ans.²⁰⁸ Le riz a probablement été utilisé par les premiers agriculteurs chinois il y a 9500 ans, tandis que le maïs a été planté en Mésomérique il y a 5500 ans. Le chat a été domestiqué en Égypte en 6000 avant Jésus-Christ.²⁰⁸

La sélection de variétés ou de races plus "utiles" à l'homme et leur diffusion artificielle par l'agriculture ont donné lieu à un phénomène très dangereux : l'érosion génétique. Le riz et le porc étaient utilisés par les premiers agriculteurs chinois il y a probablement déjà 9500 ans. En quelques années, la Chine est passée de la culture de plus de 10.000 variétés (en 1949) à quelques centaines seulement. Les variétés locales ont été réduites à de petites extensions.¹⁸⁷ En Inde aussi, la culture de plus de 30.000 variétés de riz a été réduite à quelques dizaines. Le fait qu'un écosystème pauvre en biodiversité est beaucoup plus vulnérable aux changements et aux perturbations est sous-estimé.

Nous n'avons été en mesure d'utiliser qu'une petite partie de la biodiversité que la nature et le destin nous ont donnée. L'exploitation d'une si petite partie de la richesse végétale n'est pas durable, d'autant plus que en même temps, nous détruisons définitivement la possibilité d'utiliser d'autres espèces et variétés. Pour donner quelques exemples, 96% des plus de 7.000 variétés de pommes classées aux États-Unis au début du XXe siècle ont été perdues à jamais. La grande majorité des variétés de choux, de riz, de maïs, de pois et de tomates ont également été perdues à jamais.¹⁷⁵

La réduction irréversible de la biodiversité met également en péril la sécurité alimentaire mondiale.³³⁸ Au moins 559 des 6.190 espèces de mammifères domestiquées par l'homme ont

disparu et plus de 1.000 sont menacées.³³⁹ L'extinction rapide et massive homogénéise les diverses communautés biologiques de la planète dans des environnements artificiels gérés par l'homme. Combien de temps encore pourrions-nous ignorer cette apocalypse avant qu'elle ne nous submerge ? En moins de 50 ans, la population a doublé, mais l'économie mondiale a été multipliée par 4 et le marché par 10, générant une prédation sur des ressources limitées et donc précieuses.

La majeure partie de la production industrielle mondiale de poulets de chair est assurée par quelques entreprises qui peuvent produire des dizaines de millions de descendants à partir d'un seul mâle. Ce schéma de contrôle et d'appauvrissement de la biodiversité se répète également pour le bétail : un seul taureau peut avoir des centaines de milliers de descendants.⁹⁸⁵ L'homologation génétique dans l'élevage bovin est une manifestation spectaculaire et en même temps affligeante de la domination de l'humanité sur la nature. La concentration d'animaux élevés en grand nombre et dans des espaces réduits engendre diverses conséquences telles que la surconsommation d'antibiotiques : les élevages américains consomment au moins huit fois la quantité utilisée dans les hôpitaux. Plus de la moitié du marché mondial des semences brevetées est entre les mains de quelques grandes entreprises. Quelques entreprises contrôlent la génétique des animaux et des plantes qui constituent la majeure partie de la biomasse des êtres vivants sur Terre. Les ossements fossiles terrestres les plus nombreux que nos descendants paléontologues pourront étudier sont probablement les os de poulet : des animaux créés par l'ingéniosité humaine pour satisfaire des besoins égoïstes. Lorsque nous déciderons d'agir, il sera trop tard.

Une grande partie de l'agrobiodiversité a été perdue au profit des monocultures industrielles et est naïvement sous-évaluée. Les pollinisateurs sont importants pour la production alimentaire mais aussi pour la conservation de la biodiversité : ils contribuent à maintenir des écosystèmes sains qui fournissent des services essentiels.⁸⁶³ En effet, un pollinisateur visite rarement une seule espèce végétale et, en même temps, la période pendant laquelle les insectes ont besoin de pollen et/ou de nectar est beaucoup plus longue que la période de floraison d'une seule espèce. Par conséquent, la plupart des pollinisateurs ne peuvent survivre parmi les monocultures, sauf dans des conditions artificielles telles que l'alimentation des insectes élevés.

Au moins 50% des plantes qui sont des sources de vitamine A dépendent de la pollinisation par les insectes.⁷⁴⁰ La perte de cette biodiversité pourrait accroître certaines carences nutritionnelles et maladies : selon certaines estimations (optimistes), la perte de 50% des pollinisateurs pourrait augmenter le nombre de décès jusqu'à 7 millions par an.⁷³⁶ Cette réduction pourrait être causée par les pesticides ou le changement climatique : ces deux facteurs réunis pourraient provoquer une apocalypse parmi les pollinisateurs tels que les insectes. Actuellement, pour répondre aux besoins nutritionnels de la population mondiale, il pourrait être utile d'augmenter de 10 à 20% la production végétale nécessitant une pollinisation.⁷³⁶

La valeur de la production agricole mondiale en 2016 était d'environ 2.600 milliards de dollars, tandis que la valeur de la production dépendant des pollinisateurs était estimée entre 235 et 577 milliards de dollars.^{339, 341} Au cours des 50 dernières années, le volume de la production agricole dépendant de la pollinisation par les animaux a augmenté de 300% : les abeilles sauvages contribuent à la production d'au moins 20% de ces cultures.^{341, 344} Il est probable qu'au moins un tiers de la surface agricole mondiale dépende des pollinisateurs. En outre, on estime qu'environ 90% des fleurs sauvages (310.000 espèces connues) dépendent de la pollinisation animale.³⁴¹ Pour ces raisons également, il convient d'augmenter la densité des pollinisateurs en renforçant la présence de fleurs sauvages, afin d'accroître les rendements de 20% ou plus.³⁴² Une étude portant sur les 54 cultures les plus importantes en France montre que l'intensification de l'agriculture n'a pas entraîné une augmentation des rendements des cultures dépendant de la pollinisation au cours des 20 dernières années.³⁴³ L'agriculture industrielle, caractérisée par une forte mécanisation, de grandes surfaces cultivées avec des monocultures répétées au fil des ans

et l'utilisation de produits chimiques, a entraîné une diminution des pollinisateurs et des cultures qui en dépendent.

L'agriculture favorise la réduction de la biodiversité des plantes, des insectes et des oiseaux.¹²⁴⁰ Les cultures qui ont besoin des insectes pour être pollinisées bénéficieraient d'une gestion écologique différente, c'est-à-dire d'une plus grande biodiversité. L'augmentation de l'utilisation de produits agrochimiques depuis 20 ans n'a pas généré l'amélioration attendue des rendements.

Fait intéressant, pour au moins deux milliards de personnes, les insectes font partie de la culture alimentaire : 1.900 espèces d'insectes sont utilisées pour la consommation humaine.⁷³⁶

La partie de la biodiversité qui est considérée comme utile, même pour les agriculteurs, est détruite avant qu'elle ne puisse être exploitée commercialement. Parmi les insectes pollinisateurs importants figurent les abeilles sans dard : des centaines d'espèces appartenant à au moins 21 genres ont été classées. Il s'agit notamment des hyménoptères de la famille Apidae Meliponini, qui est un groupe comprenant plus de 500 espèces. En anglais, on les appelle stingless bees ou stingless honey bees.⁷³⁰ Ces insectes (les Meliponini) ont des dards, mais ils sont extrêmement petits et ne peuvent pas être utilisés pour se défendre. Le genre *Melipona* se trouve dans les régions tropicales et subtropicales, comme l'Australie, et comprend environ 50 espèces. Un autre genre important est *Trigona* et comprend environ 130 espèces, également présentes dans les régions tropicales.^{729, 731} Certains de ces insectes peuvent polliniser des dizaines d'espèces végétales différentes, ils peuvent se déplacer dans un rayon de quelques kilomètres (*Meliponia panamica* jusqu'à 2,1 km), certains forment des colonies de milliers d'individus (*Trigona carbonaria* forme des colonies de 10.000 individus, qui effectuent plus de 20.000 vols par jour) ; ils ont des caractéristiques similaires à celles des abeilles domestiques et, comme celles-ci, ont la possibilité d'être élevés dans des nids artificiels. Ces insectes pourraient être d'une importance fondamentale pour la pollinisation des cultures tropicales dans les régions où *Apis mellifera* n'existe pas naturellement. Parmi les cultures pollinisées par ces abeilles sociales sans dard figurent des cultures commercialement importantes comme les fraises, les pêches, les poires, le café, les cerises, les noix de coco, les mangues et les oignons.⁷²⁹ Le café est une plante autofécondante mais bénéficie de la présence d'insectes pollinisateurs sauvages (ce qui améliore la qualité et la quantité des récoltes).⁸⁶⁷ Pour les cultures telles que les avocats et les mangues, plusieurs espèces sauvages importantes pour le service de pollinisation ont également été identifiées (appartenant à 11 familles dans le cas des avocats et à 8 familles dans le cas des mangues).¹¹⁸⁶ Malheureusement, les informations sur les services rendus par les espèces sauvages sont souvent rares et insuffisantes, de sorte que leur importance pour la sécurité alimentaire peut être sous-estimée. Une communauté de pollinisateurs diversifiée est certainement plus résiliente et améliore la production agricole. Afin d'assurer une plus grande biodiversité parmi les pollinisateurs, il est nécessaire de s'éloigner des principes non conservateurs sur lesquels repose l'agriculture chimique industrielle. Dans certaines cultures, l'efficacité et l'efficience de la pollinisation par ces insectes sont supérieures à celles des abeilles domestiques, car ces dernières ne visitent pas les fleurs, ne recueillent que du nectar ou sont moins efficaces. Le maintien de zones semi-naturelles ou naturelles à proximité des cultures augmente la probabilité de survie de ces insectes et la résilience du système agricole. Le risque de réduire le service de pollinisation à quelques espèces d'insectes exclusivement sélectionnées est risqué car il augmente l'incertitude et l'instabilité à un degré inacceptable.

Il y avait probablement plus de sept mille entreprises de semences dans le monde en 1981, après trente ans, six entreprises multinationales contrôlent environ 63% du marché. Ces mêmes entreprises contrôlent au moins 75% du marché mondial des pesticides.¹⁹⁶ Un monopole a été créé qui prive une grande partie de la population mondiale de la souveraineté et de l'autosuffisance alimentaires : l'autosuffisance dans la capacité de se reproduire et de choisir les espèces et les variétés à cultiver et à élever est gravement compromise. Des contraintes économiques et des systèmes alimentaires non durables, qu'une société tournée vers l'avenir

aurait dû éviter, ont été encouragés. Malheureusement, l'insécurité alimentaire augmente de manière irréversible. Le droit des peuples et des États à décider de leur propre politique alimentaire est de plus en plus mis à mal par les abus des puissants.

LES POLLINISATEURS ET LA SÉCURITÉ ALIMENTAIRE

La production agricole dépend des ressources utilisées (par exemple, les combustibles fossiles, les engrais, les pesticides, les machines, l'irrigation) et des services fournis par les écosystèmes : fertilité des sols, précipitations, climat, pollinisateurs, arthropodes qui prédatent les parasites des cultures. Malheureusement, la contribution au service de pollinisation n'est connue ou partiellement connue que pour une petite fraction des pollinisateurs sauvages potentiels. Certains chercheurs suggèrent que nous disposons d'informations sur les bénéfices générés par la pollinisation pour environ 12% des espèces d'abeilles étudiées.¹¹⁷⁶ Ainsi, pour la plupart des espèces, nous n'avons aucune connaissance ou des informations insuffisantes. La plupart des insectes pollinisateurs, tels que des milliers d'espèces d'abeilles, risquent de disparaître à jamais avant que nous sachions quels sont les avantages potentiels pour la sécurité alimentaire (et autre).

Une culture est considérée comme très dépendante des pollinisateurs lorsqu'en l'absence de ces derniers, la production est réduite jusqu'à 95% (par exemple, les amandes et les citrouilles). Une culture est classée comme modérément dépendante des pollinisateurs lorsqu'en leur absence la production est réduite de 65%. En 45 ans (1961-2006), la production mondiale des cultures fortement dépendantes des insectes a moins augmenté que celle des cultures peu ou pas du tout dépendantes des pollinisateurs.⁴⁷⁸ La production alimentaire qui dépend directement des pollinisateurs représente probablement entre 5 et 8% de la production alimentaire mondiale.^{481, 484}

L'utilisation continue et systématique d'insecticides entraîne une diminution de la production des plantes qui ont besoin de la pollinisation, y compris celles cultivées par l'homme.⁴⁵⁰ En quelques décennies seulement, une réduction drastique de la biodiversité végétale et de l'approvisionnement alimentaire a été enregistrée. Plus l'offre de plantes diminue, plus la possibilité d'avoir une alimentation équilibrée diminue. Il convient de rappeler qu'au moins 2 milliards d'êtres humains souffrent de malnutrition en raison d'un manque de nutriments tels que les vitamines et certains minéraux ; 750 millions d'autres souffrent de dénutrition et 2 milliards de surpoids ou d'obésité.^{415, 985} La réduction des pollinisateurs diminue également la capacité à produire des médicaments, des fibres végétales et d'autres matériaux.

Les pollinisateurs et leur service essentiel à l'agriculture sont gravement compromis. Plus de 90 espèces végétales importantes pour l'alimentation humaine dépendent des pollinisateurs et, en particulier, des abeilles domestiques. En même temps, malheureusement, au moins une colonie d'abeilles sur trois meurt chaque année à cause des pesticides et de la réduction irréversible de la biodiversité végétale. Pour compenser la perte des pollinisateurs sauvages, les producteurs de fruits et légumes du monde entier utilisent, outre les abeilles domestiques, au moins 48 autres espèces d'insectes pollinisateurs gérées à cette fin.³³⁸

La pénurie de pollinisateurs pour la production alimentaire est confirmée par la culture des amandes en Amérique du Nord. Aux États-Unis, plus de 1,5 million de colonies d'abeilles domestiques (représentant environ 75% des colonies présentes) sont déplacées chaque année pour polliniser les amandes de Californie (au moins 4 colonies par hectare). Il s'agit de l'une des plus grandes migrations artificielles de la planète, qui se déroule par transport routier. Aux États-Unis, plus de 90% des colonies d'abeilles domestiques sont déplacées pour aider à polliniser quelques cultures : amandes, pommes, melons, luzerne (à partir de graines), prunes, avocats, myrtilles, cerises, concombres, poires, tournesols, citrouilles et légumineuses.⁹⁷⁴

En 50 ans (1961-2012), la production mondiale dépendant des pollinisateurs a été multipliée par quatre, tandis que la production ne dépendant pas des pollinisateurs a été multipliée par deux. En 50 ans, la production agricole a augmenté sa dépendance à la pollinisation, même si les quantités produites sont plus faibles que pour les cultures non dépendantes des pollinisateurs.⁴⁸¹

Si les abeilles venaient à disparaître, l'approvisionnement alimentaire de l'espèce humaine serait fortement réduit. On estime qu'entre 15 et 30% de l'alimentation humaine dépend, à des degrés divers, des pollinisateurs.⁴¹⁵ Sur les 124 espèces végétales les plus importantes pour la consommation humaine, 87 (70%) dépendent des animaux pollinisateurs.⁴¹⁵ Ces 87 espèces représentent environ 35% de la quantité totale de nourriture végétale produite. Par exemple, la présence d'abeilles domestiques et sauvages augmente la production des cultures de coton (*Gossypium hirsutum*) et de sésame (*Sesamum indicum*) (au Burkina Faso, en Afrique, où, par exemple, la culture du coton est une importante source de revenus : 60% du volume des exportations). Des essais sur le terrain ont montré que l'absence de service de pollinisation entraîne une réduction des rendements de 37% dans le cas du coton et de 59% dans le cas du sésame (les fleurs de coton, qui fleurissent généralement une par une par jour, sont visitées par au moins 30 espèces différentes, dont *Apis mellifera*).¹¹⁸⁸ De nombreuses cultures dépendent des pollinisateurs, qu'ils soient élevés ou sauvages, dont les avantages sont souvent sous-estimés.

Une pénurie mondiale de pollinisateurs (abeilles, mais aussi bourdons, papillons, coléoptères, oiseaux et chauves-souris) pourrait entraîner la perte de 23% des fruits, 16% des légumes et 22% des noix et graines (estimations partielles et optimistes).⁶⁷⁶ La plupart des espèces cultivées ont besoin de pollinisation et, bien qu'elles ne représentent qu'un dixième de la production agricole totale, elles contribuent à environ un tiers de la valeur marchande.⁶⁷⁶ En fait, les cultures non pollinisées (par exemple, le maïs, le blé) ont une valeur marchande par unité de poids inférieure à celle des cultures pollinisées (par exemple, les fruits). Les cultures pollinisées ont souvent une valeur nutritionnelle plus élevée et contribuent à fournir des nutriments essentiels tels que des vitamines, des antioxydants, des minéraux et des fibres.⁶⁷⁶ Selon certaines estimations optimistes, la disparition des pollinisateurs en Europe pourrait réduire l'approvisionnement alimentaire d'au moins 7%.⁴¹⁵ En Europe, au moins 12% des terres agricoles dépendent de pollinisateurs tels que l'abeille domestique et les bourdons. Les cultures dépendant des pollinisateurs en Europe représentent économiquement 31% de la valeur marchande de la production agricole, et la valeur du service de pollinisation est estimée entre 10% et 12% de celle de la production agricole.⁴¹⁵

En Italie, au moins 600.000 hectares ont été cultivés avec des plantes dépendant des pollinisateurs en 2017 ; en 2016, plus de 40.000 hectares ont été cultivés pour la multiplication de semences de légumes. On peut considérer qu'au moins 10% de la surface agricole de l'Italie dépend des pollinisateurs.^{196, 199} La capacité du service de pollinisation en Italie ne couvre que 60% de la demande réelle, il y a donc un besoin de pollinisateurs en Italie également.¹⁹⁹ L'absence de ce service génère des dommages économiques mesurables en millions d'euros. En raison de la diminution du service de pollinisation, dans le pire des cas, davantage de personnes mourront de faim ou souffriront de malnutrition.

Il convient également de remarquer qu'au moins 20.000 espèces de pollinisateurs sont classées, et que la plupart des fleurs sauvages dépendent de ces insectes.¹⁹⁶ On estime que 85% des plantes à fleurs sauvages dépendent des pollinisateurs : au moins 299.200 espèces.⁴¹⁵

Plutôt que de se demander si les humains seront capables de survivre sans pollinisateurs, il serait plus correct de se concentrer sur la question de savoir si nous pouvons résister aux changements qui font que les insectes sauvages, mais aussi élevés, réduisent leur capacité de survie.

L'augmentation du nombre d'espèces végétales à proximité des cultures profite à la fois aux pollinisateurs et à d'autres organismes utiles tels que les ennemis naturels des ravageurs des plantes : il s'agit d'une lutte biologique naturelle.⁴⁷¹ Certaines estimations économiques, bien

qu'ayant de nombreuses limites, valorisent le service rendu par la forêt à proximité des plantations de café plus que la valeur de la forêt elle-même, car les pollinisateurs de cette culture sont avantagés. Les services tels que la pollinisation, offerts par un environnement sauvage à une culture, peuvent encourager la conservation des zones naturelles. À proximité des cultures, les services offerts par un environnement complexe et riche en biodiversité qui peuvent être monétisés comprennent la pollinisation (par les animaux sauvages) et la présence d'ennemis naturels des ravageurs des cultures. Ces derniers limitent les dommages économiques aux cultures. Dans un environnement agricole présentant une plus grande biodiversité, les pollinisateurs et les ennemis naturels des ravageurs des plantes sont plus nombreux. C'est également le cas en polyculture par rapport à la monoculture. Les informations sur ces deux types de services rendus par la nature aux cultures sont rares et fragmentaires. D'après certaines indications tirées de la culture des pastèques, la pollinisation par les abeilles sauvages est suffisamment efficace lorsque 30% des terres situées dans un rayon de 1.200 m de la culture sont constituées de plantes sauvages.⁴⁷¹ L'augmentation de la complexité des écosystèmes agricoles a des effets positifs tant sur l'abondance que sur la richesse des abeilles, des araignées, des plantes herbacées et des arbres. Il s'agit toutefois d'une vision très anthropocentrique et donc biaisée, car elle se fonde uniquement sur la quantification d'un avantage économique à court terme pour l'agriculteur. Si les services offerts par la nature étaient inventoriés, cela aurait l'avantage de disposer d'arguments sur lesquels les économistes et les agriculteurs sont très sensibles et réceptifs. Ainsi, des stratégies de conservation, telles que l'affectation d'un pourcentage de la surface cultivée à des plantes sauvages pour la protection de la biodiversité naturelle, pourraient être plus facilement proposées.

Environ 70% des 1.330 cultures tropicales et 85% des 264 cultures européennes bénéficient dans une certaine mesure du service de pollinisation assuré par les animaux.⁶¹⁵ En termes économiques, les pollinisateurs peuvent probablement augmenter de 75% la productivité d'au moins 115 cultures. Par conséquent, on peut s'attendre à une augmentation de l'insécurité alimentaire à la suite du déclin des pollinisateurs. Les informations dont nous disposons ne sont pas rassurantes :

- La biodiversité diminue rapidement, les habitats sauvages sont détruits et le nombre de pollinisateurs sauvages est en baisse.
- La stabilité de la production agricole dépend également de la présence de pollinisateurs sauvages qui, toutefois, diminuent rapidement.
- Le recours à la reproduction artificielle des pollinisateurs, tels que les abeilles domestiques et les bourdons, ne peut compenser la perte de biodiversité. Dans de nombreux pays, le nombre d'abeilles domestiques détenues est en baisse et, de toute façon, ne suffit pas à répondre à la demande croissante de pollinisation dans le monde. La demande des agriculteurs pour le service de pollinisation augmente plus vite que la disponibilité des insectes d'élevage.
- L'augmentation de la demande de nourriture est obtenue grâce à l'utilisation accrue de méthodes agricoles destructrices (par exemple, les pesticides, la monoculture, le labourage) et à la dégradation accrue des zones naturelles pour planter des cultures et du bétail. Cette tendance peut générer une augmentation de la production agricole à court terme, mais sera contre-productive à long terme.

Tous ces éléments combinés laissent penser qu'il sera difficile d'espérer une augmentation de la production agricole des espèces dépendant des pollinisateurs. Au contraire, il est plus réaliste de prévoir une réduction de la productivité des espèces végétales dépendant des pollinisateurs, mais il faut souligner que les cultures dépendant des pollinisateurs permettent, en moyenne, des gains plus élevés, jusqu'à cinq fois plus élevés.⁶¹⁵ Pour compenser la diminution des pollinisateurs, les règles économiques ont imaginé des remèdes non durables :

- L'élevage d'abeilles domestiques pour polliniser, par exemple, les pommes, les cerises, les amandes, les pastèques, les citrouilles et les melons.
- L'élevage des bourdons pour polliniser les tomates.
- La pollinisation est effectuée à la main par des travailleurs de la vanille et, dans certains vergers, dans des régions de la planète où les produits chimiques ont détruit les pollinisateurs et où la main-d'œuvre, dans des conditions éthiquement douteuses, est considérée comme bon marché. Le pollen est collecté manuellement et stocké au froid pour l'année suivante, ou est collecté dans les régions où le climat permet une floraison précoce.

En conclusion, les cultures dépendant de la pollinisation sont plus instables et fortement et négativement affectées par les changements en cours. L'une des conséquences est qu'entre 1961 et 2008, environ 70% de l'augmentation de la superficie cultivée était liée à la propagation d'espèces non dépendantes de la pollinisation.^{615, 616}

De nombreuses prédictions se fondent principalement sur des évaluations économiques et ne tiennent pas compte ou sous-estiment le fait que les conditions conduisant à la disparition des pollinisateurs compromettront la capacité des écosystèmes à soutenir une population humaine qui s'attend à croître en nombre et souhaite augmenter la consommation de ressources qui ne seront plus disponibles.

LA PERTE DE LA SOUVERAINETÉ ALIMENTAIRE ACCROÎT L'INSÉCURITÉ

Avec l'établissement de règles économiques qui favorisent les monopoles et les oligopoles, la souveraineté alimentaire est diminuée. L'incapacité des États, mais aussi des communautés locales, à décider de manière autonome et libre ce qu'ils veulent produire, comment le produire, y compris d'un point de vue écologique et social, et à décider vers quels marchés diriger leurs produits, est une source dévastatrice et non durable d'insécurité et d'esclavage. La perte de souveraineté alimentaire peut aussi facilement conduire à l'incapacité de répondre aux besoins nutritionnels des populations locales pour assurer une bonne santé. La réduction de la sécurité et de la souveraineté alimentaires est très dangereuse et doit être combattue avec plus d'énergie que nous ne le faisons. Nous avons donné les clés de nos garde-manger à quelques grandes entreprises, qui fonctionnent selon des logiques de marché totalement artificielles, détachées de l'écologie et de la sécurité sociale. En même temps, la capacité des générations futures à assurer elles-mêmes les ressources alimentaires nécessaires a été gravement compromise. La disponibilité de la nourriture est un droit civil, économique et social fondamental qui favorise l'égalité, la liberté et la dignité de tous les êtres humains. Nous avons gravement compromis ce droit en donnant le contrôle de notre liberté à quelques entrepreneurs qui sont si puissants qu'ils peuvent influencer la vie et la santé de la planète entière. Afin de promouvoir une plus grande justice, il est important d'accroître la transparence, de rétablir le lien entre les producteurs et les consommateurs et de promouvoir des pratiques respectueuses de l'environnement et durables.

La réduction de l'indépendance de la production alimentaire et de l'agro-diversité est très dangereuse. 63% du marché des semences et 75% du marché des pesticides dans le monde sont contrôlés par quelques multinationales.¹⁹⁶ Cette concentration de pouvoir confère une force économique et politique risquée et, en même temps, est une manifestation de l'illusion de toute-puissance. Rappelons que la production alimentaire mondiale est responsable de 60% de la réduction de la biodiversité et d'au moins 24% de toutes les émissions de gaz altérant le climat.

EFFETS SUBLÉTAUX DES PESTICIDES SUR LA FAUNE SAUVAGE

Les insecticides, tels que les néonicotinoïdes et le fipronil, sont associés à une augmentation des maladies infectieuses chez les animaux sauvages.⁴⁴² Chez les poissons, les amphibiens et les oiseaux, ces pesticides inhibent les défenses immunitaires et les affaiblissent. Ainsi, l'inhibition du système immunitaire causée par l'utilisation des néonicotinoïdes et du fipronil favorise l'apparition d'épidémies chez les animaux sauvages.

La DL₅₀ de l'imidaclopride est de 40 ng par abeille (bien inférieure à celle d'autres insecticides) mais l'ingestion quotidienne de 1 pg (une dose 4.000 fois inférieure) tue les abeilles en moins de 10 jours. En outre, l'imidaclopride se dégrade lentement en au moins six métabolites, dont certains sont plus toxiques que la molécule de départ. Des concentrations comprises entre 2 ppb et 50 ppb (par exemple dans le pollen) sont suffisantes pour générer des effets sublétaux graves chez les abeilles ; 5 ppb (parties par milliard ou 0,005 mg/kg) sont suffisantes pour favoriser l'émergence de parasites tels que le champignon pathogène *Nosema ceranea*.

Les chauves-souris sont lésées à la fois par la disparition de leurs proies (les insectes) et par le fait qu'elles contiennent des insecticides à des doses nocives.⁴⁴²

L'acétamipride et la clothianidine altèrent le système immunitaire des rats et pourraient donc avoir le même effet chez d'autres mammifères, y compris l'homme.

Les insecticides néonicotinoïdes se retrouvent dans le pollen et le nectar des plantes traitées, mais aussi dans les plantes des champs voisins. Ces molécules contaminent l'eau à tel point qu'on les retrouve dans plus de 50% des rivières surveillées aux États-Unis.⁴⁸³ Il a été démontré que les insecticides néonicotinoïdes inhibent les défenses immunitaires des moules (mollusques) et des poulets.⁴⁸³ L'utilisation d'insecticides dans les rizières a été responsable d'une augmentation de la mortalité des poissons, en raison de la présence simultanée de parasites (*Trichodinia* chez le poisson medaka).⁴⁸³ Certains néonicotinoïdes peuvent rester longtemps dans l'eau : la demi-vie de la clothianidine est de plus de 500 jours dans l'eau, et de un à deux ans dans le sol. Cette persistance nuit à la faune aquatique comme les poissons exposés aux traitements dans les rizières (par exemple le médaka, le poisson du riz ou *Oryzias latipes*).⁴⁴²

En Europe (Allemagne et France) et en Australie (Victoria), les pesticides sont impliqués dans la réduction de la biodiversité des invertébrés. Sur les sites les plus contaminés par l'utilisation de pesticides, la biodiversité des invertébrés est réduite jusqu'à 42% en Europe (France et Allemagne) et jusqu'à 27% en Australie.^{276, 277} La présence de pesticides est négativement corrélée avec la richesse et l'abondance des espèces observées. Des diminutions significatives du nombre d'espèces sont enregistrées même lorsque les concentrations de substances toxiques sont très faibles, c'est-à-dire qu'elles sont considérées comme non préoccupantes. Des réductions de la biodiversité sont enregistrées à des concentrations de pesticides entre 100 et 10.000 fois inférieures à ce qui est considéré comme létal pour 50% des individus d'un organisme aquatique (CL₅₀ ou concentration létale pour 50% des individus exposés) : *Daphnia magna* ou puce d'eau ; c'est un petit crustacé aquatique.²⁷⁷ Des effets très spectaculaires sont enregistrés à des concentrations considérées comme sûres par les normes européennes sur les pesticides utilisés en agriculture. L'évaluation actuelle des risques a abouti à une législation européenne qui tolère et considère comme non dangereuses des concentrations de pesticides qui endommagent en fait les invertébrés de manière irréversible. On considère à tort qu'aucun effet indésirable ne devrait être enregistré en dessous d'une dose inférieure à un centième de celle capable de tuer 50% du crustacé *Daphnia magna* en laboratoire ; cela vaut également pour les poissons. L'utilisation de pesticides est donc responsable de la réduction de la biodiversité : la corrélation a été démontrée pour 21 pesticides utilisés en Allemagne, 10 en France et 97 en Australie (sur plus de 400 ingrédients actifs utilisés : ils sont donc utilisés avant

d'avoir des garanties). Les preuves d'une corrélation entre la réduction de la biodiversité et l'utilisation de pesticides sont solides, même si l'on n'examine que certaines des substances actives utilisées, et même si l'on ne tient pas compte des effets des métabolites et des autres molécules présentes dans les préparations commerciales.²⁷⁷ Malheureusement, l'utilisation de ces molécules toxiques augmente à l'échelle mondiale, notamment en raison du changement climatique.

Les fongicides peuvent favoriser les insectes nuisibles car ils peuvent tuer les champignons qui les parasitent. Par exemple, le bénomyl, qui est un fongicide, favorise la propagation de certains insectes nuisibles dans le soja car il tue les champignons entomophages qui contribueraient à limiter leur croissance.⁵⁰² Les coûts de destruction des ennemis naturels des insectes nuisibles aux cultures générés par l'utilisation de pesticides peuvent être estimés entre 25 et 50% des coûts générés par l'utilisation d'insecticides (par exemple dans le coton, les pommes, les pêches, les oranges).⁵⁰² Dans les agro-écosystèmes, les ennemis naturels des ravageurs des cultures sont responsables d'au moins 50% du contrôle de la croissance des pathogènes.

Les pesticides ont également des effets négatifs directs et indirects sur les vertébrés sauvages.⁴¹² Un effet indirect de la réduction de la présence d'insectes est une réduction des animaux qui s'en nourrissent, comme les oiseaux, les reptiles (par exemple les lézards), les poissons et les amphibiens.⁵⁵² Les insectes peuvent constituer entre 40 et 90% du régime alimentaire des poissons d'eau douce et 75% de celui des amphibiens et des lézards. Les effets sublétaux sont connus pour résulter de l'exposition à de petites doses de pesticides. Les effets sublétaux enregistrés comprennent les effets génotoxiques et cytotoxiques, les altérations du système immunitaire, la réduction du succès de la reproduction (par exemple, enregistré chez les bruants au Royaume-Uni). Tous ces effets sont générés chez les vertébrés sauvages à des doses bien inférieures à celles nécessaires pour enregistrer une mortalité à court terme (celle de l'intoxication aiguë). Il a été démontré que l'ingestion de quelques graines traitées à la clothianidine et au fipronil était suffisante pour tuer de petits oiseaux ou causer de graves problèmes de reproduction.⁴¹² Les insecticides peuvent réduire la capacité de vol des moineaux, et peuvent altérer le système immunitaire et endommager l'ADN des cailles et des perdrix.

L'imidaclopride, la clothianidine et le fipronil (trois insecticides) sont toxiques pour les oiseaux et les poissons. La clothianidine peut être présente à des doses comprises entre 4 g et 7,5 g par kilo de graines de colza et l'imidaclopride entre 2,1 et 6,6 µg/kg dans les graines de maïs. Des concentrations plus élevées d'imidaclopride peuvent être enregistrées dans les feuilles de betterave sucrière provenant de graines traitées (1-12,4 mg/kg). Ainsi, les animaux granivores (par exemple, les oiseaux, les petits mammifères) et les animaux herbivores (par exemple, les insectes, les petits mammifères) sont exposés à des doses importantes.

Les graines de colza et de coton traitées à la clothianidine réduisent les chances de survie des petits mammifères et des oiseaux. Pour les moineaux et les perdrix, il suffit d'ingérer entre 1,5 et 6 graines de betteraves traitées à l'imidaclopride pour atteindre une dose pouvant les tuer avec une probabilité de 50%, mais la quantité d'imidaclopride contenue dans un quart de graine est suffisante pour générer des effets sublétaux.

Dans le sol cultivé avec du blé, des concentrations d'imidaclopride comprises entre 18 et 60 µg/kg ont été enregistrées, tandis qu'après le semis de semences de maïs traitées, des concentrations allant jusqu'à 652 µg/kg ont été enregistrées dans le sol (cette concentration tombe à 11 µg/kg 30 jours après la récolte du maïs) ; cela signifie que les organismes vivant dans le sol (par exemple les fourmis, les termites, les vers de terre) sont également exposés à des concentrations élevées.⁴¹² À cet égard, il est intéressant de rappeler que la plupart des insectes pollinisateurs sauvages passent une partie de leur vie dans le sol (ponte des œufs, par exemple). Dans la végétation naturelle autour des champs de maïs, dont les graines ont été traitées à la clothianidine, des concentrations d'imidaclopride allant jusqu'à 9 µg/kg ont été enregistrées.⁴¹²

Les insecticides réduisent la biodiversité de l'écosystème aquatique. Dans les rizières, les néonicotinoïdes sont utilisés pour tuer des insectes tels que le charançon du riz (*Lissorhoptrus oryzophilus*), qui mange les feuilles de la plante.⁴¹⁵ L'aquaculture subit également les effets néfastes des pesticides. Les poissons stressés par une contamination chimique étendue sont plus sensibles aux parasites (par exemple, les poissons *medaka* sont plus sensibles au parasite *Trichodina ectoparasite* si l'imidacloprid est présent).⁴¹⁵ Les pesticides, à très faible dose, génèrent des altérations qui peuvent être mesurées par des modifications des activités enzymatiques dans le foie des poissons (indicateurs de dommages hépatiques qui sont des effets sublétaux). Les mollusques tels que les moules (*Mytilus galloprovincialis*) présentent également des effets néfastes dus à l'exposition à de très faibles concentrations d'insecticides (par exemple, l'imidaclopride).

Les pesticides peuvent être persistants dans l'environnement et peuvent donc causer des problèmes longtemps après leur distribution et loin de l'endroit où ils ont été utilisés. On peut le souligner en rappelant la présence d'insecticides organochlorés et de PCB chez les cétacés.²⁹⁹

Nous sommes à l'origine d'un désastre écologique et nous semblons avoir oublié que nous avons besoin de vers dans le sol, de mouches, de scarabées, de micro-organismes et de champignons pour décomposer les excréments, de coccinelles et de syrphes pour manger les pucerons, de bourdons et de papillons pour polliniser les plantes, de micro-organismes pour aider les plantes à fixer l'azote atmosphérique. Nous nous dirigeons vers l'Érémoène, qui, ne l'oublions pas, ne peut exister que pendant une période très courte, car l'effondrement des services fournis par la nature entraîne immédiatement l'effondrement de la société humaine. Nous avons l'illusion de nous être libérés des contraintes évolutives de la sélection naturelle, alors qu'en fait nous continuons à dépendre des systèmes biologiques et géologiques de la planète que nous modifions à un rythme insoutenable.

LES OISEAUX ET LES POLLINISATEURS PARTAGENT LE MÊME SORT FUNESTE

Depuis plusieurs décennies, des cas d'empoisonnement d'oiseaux par des pesticides, par exemple des organochlorés et des organophosphorés en Argentine et au Venezuela dans les années 1960, ont été enregistrés dans le monde entier.⁴³¹ La disparition des insectes est étroitement liée à la réduction quantitative et qualitative du nombre d'oiseaux. On estime que le nombre moyen d'oiseaux en Europe a diminué de 56% entre 1980 et 2015 (au moins 500 millions d'oiseaux en moins).³⁰⁷ En Europe, 37 espèces d'oiseaux des champs (moineaux, alouettes, linottes, pipits, bécasseaux jaunes, etc.) ont vu leurs effectifs réduits de plus de 52% en moyenne sur 30 ans. De nombreux oiseaux survivent en mangeant des insectes. Ces deux groupes d'animaux sont donc étroitement liés.

Chez les animaux sauvages tels que les oiseaux, des cas d'empoisonnement par les pesticides sont enregistrés en Europe ; les oiseaux, s'ils ne sont pas tués par la chasse, sont empoisonnés par le plomb des balles.⁴²⁹

Dans les campagnes françaises, les populations d'oiseaux ont été réduites d'au moins un tiers en 20 ans.⁴²¹ Des espèces telles que l'alouette des champs, le moineau et la fauvette grisette ont perdu au moins un individu sur trois en moins de 20 ans. Pour certaines espèces, la réduction est plus dramatique : huit individus sur dix ont disparu dans le cas des perdrix. Les alouettes ont connu une réduction d'au moins 35%. Malheureusement, le taux d'extinction a augmenté ces dernières années (2016 et 2017). Le déclin de ces espèces est lié à celui enregistré chez les insectes. De nombreux oiseaux se nourrissent d'insectes, et même les oiseaux granivores peuvent en consommer au cours de leur vie. Parmi les facteurs accélérant la disparition des oiseaux figurent le traitement des semences par des insecticides et l'utilisation d'herbicides. Pour

les petits oiseaux, comme les moineaux, il suffit de manger deux ou trois graines (de blé ou de maïs, par exemple) traitées aux néonicotinoïdes pour mourir. D'autres facteurs qui réduisent la possibilité de reproduction des oiseaux sont le manque de zones de refuge dans lesquelles nicher et le travail du sol : de nombreux oiseaux nichent sur le sol. Citons par exemple le bruant jaune (*Emberiza citrinella*) qui niche au sol dans l'herbe ou les haies, et la femelle de la fauvette grisette (*Sylvia communis*) qui construit des nids cachés dans les chaumes à une courte distance du sol ; ces oiseaux sont migrateurs et viennent d'Afrique du Nord en Europe.^{797, 798} La création de zones semi-naturelles, non cultivées et arborées offre des possibilités d'alimentation et de nidification à de nombreuses espèces d'oiseaux qui se nourrissent également d'insectes.⁹⁶²

En France, l'analyse des causes de 3.130 incidents impliquant la mort d'oiseaux en raison d'une suspicion d'empoisonnement, entre 1995 et 2014, révèle que 103 incidents étaient définitivement liés à l'utilisation de semences traitées avec des pesticides, notamment l'imidaclopride.⁴²² Sur ces 103 cas d'intoxication, 101 sont survenus à l'occasion de l'ensemencement de céréales (blé, orge, maïs) et résultent de l'utilisation d'imidaclopride (insecticide néonicotinoïde présent dans le foie et les graines du tube digestif).⁴²² Au total, 101 cas d'empoisonnement à l'imidaclopride ont entraîné la mort de onze espèces d'oiseaux et d'un mammifère (le lièvre commun ou *Lepus europaeus*) ; ensemble, ils ont causé la mort d'au moins 734 animaux. Une moyenne de 7 animaux morts a été collectée par incident. Parmi les oiseaux les plus touchés figurent la perdrix grise (*Perdix perdix*), le pigeon ramier (*Columba palumbus*) et le pigeon biset (*Columba livia*).^{426, 427, 428} Les pigeons ont été impliqués dans 51% des incidents et les perdrix dans 38%. Parmi les animaux morts, 81% étaient des columbidés. Pour la plupart des oiseaux, il suffit d'ingérer quelques graines traitées à l'insecticide pour atteindre la dose capable de les tuer, avec une probabilité de 50% (DL₅₀).⁴²² Le semis du blé consiste à semer entre 150 et 450 graines par mètre carré, dont une fraction (environ 40 graines par mètre carré, soit environ 9%) reste en surface et est donc facilement utilisable par les oiseaux (chaque graine contient entre 0,028 et 0,042 mg d'imidaclopride). Les céréales telles que le blé sont principalement semées en automne sur 6 millions d'hectares. Des troubles du comportement ont été enregistrés dans 39,6% des accidents : chute soudaine en vol, paralysie ou parésie, désorientation, apathie et baisse de vigilance. Les chercheurs concluent l'article en soulignant que les concentrations d'imidaclopride trouvées dans le foie des oiseaux morts peuvent être si faibles (de l'ordre du milliardième de gramme par gramme) qu'elles ne peuvent être facilement mesurées analytiquement. Par conséquent, des effets létaux peuvent être générés par de très faibles doses.

Certaines études ont enregistré jusqu'à 9 oiseaux tués par hectare en raison de l'exposition aux pesticides.⁴²⁵ On estime que la distribution de 500.000 kg de pesticides aux États-Unis tue chaque année plus de 72.000 oiseaux adultes et endommage plus d'un demi-million de colonies d'abeilles et autres pollinisateurs sauvages.⁴²⁵ Ces chiffres sont probablement sous-estimés, mais ils donnent une idée de la gravité du problème et suggèrent que des mesures doivent être prises avant qu'il ne soit trop tard.

Les pesticides peuvent s'accumuler et sont capables de nuire à la reproduction des oiseaux, comme cela a été démontré depuis les années 1960 pour les insecticides organochlorés tels que le DDT. En Italie, des résidus de pesticides organochlorés et de leurs dérivés sont trouvés dans les œufs d'oiseaux (par exemple de crécerelles : un petit oiseau migrateur de proie qui se nourrit de souris et d'autres rongeurs, de petits oiseaux, d'insectes et de vers de terre) en quantités suffisantes pour endommager gravement l'épaisseur de la coquille.^{26, 430} Des concentrations dangereuses d'insecticides organochlorés sont également trouvées dans le foie des oiseaux de proie en Grèce.⁴³²

Les travaux menés aux Pays-Bas montrent une forte corrélation entre la présence d'imidaclopride dans les eaux de surface (à des concentrations de l'ordre du milliardième de gramme par litre : 20 ng/L) et le déclin des oiseaux, de l'ordre de 3,5% par an.⁴³⁴ Les chercheurs

ont extrapolé ce résultat en étudiant 15 espèces d'oiseaux, dont neuf sont insectivores mais qui nourrissent tous leurs poussins d'invertébrés (certains, comme les passereaux et les étourneaux, sont également granivores). Les néonicotinoïdes peuvent rester dans l'eau pendant de longues périodes (l'imidaclopride a une demi-vie dans l'eau comprise entre 30 et 162 jours).⁴³⁴

Une étude menée en Suisse au printemps 2015 a démontré la présence d'insecticides néonicotinoïdes dans les 146 échantillons de plumes de moineaux domestiques (*Passer domesticus*), qui se nourrissent à la fois d'insectes et de graines.⁴⁴¹ Chaque échantillon était composé des plumes de trois oiseaux capturés au même moment et sur le même site. Le thiaclopride était présent dans 99% des échantillons de plumes et la clothianidine, qui a été détectée dans 75% des échantillons, a atteint les concentrations les plus élevées (131,4 ng/g). L'imidaclopride est trouvé dans 40% des échantillons de plumes, l'acétamipride dans 37% et le thiaméthoxam dans 24%. Moins de 9% des échantillons ne contenaient qu'un seul néonicotinoïde mais 5,5% des échantillons contenaient les 5 néonicotinoïdes recherchés. Les oiseaux vivant à proximité de champs cultivés biologiquement présentaient des concentrations plus faibles (maximum 23,6 ppb) que celles trouvées dans les plumes d'oiseaux provenant de zones cultivées conventionnellement (maximum 140,5 ppb).⁴⁴¹ Ces données confirment l'omniprésence des néonicotinoïdes dans l'environnement et l'exposition des oiseaux à des mélanges complexes dont les effets synergiques, additifs et sublétaux sont largement inconnus. Chez les oiseaux, les effets sublétaux des néonicotinoïdes comprennent la perturbation des hormones thyroïdiennes et des effets néfastes sur la reproduction et le développement embryonnaire. Les recensements effectués en Amérique du Nord entre 1966 et 2013 montrent une réduction de 74% du nombre d'espèces d'oiseaux vivant dans les zones agricoles (57 des 77 espèces recensées).⁴⁴⁴ Le groupe d'oiseaux dont le déclin est le plus marqué est celui des insectivores. Les causes les plus importantes de la réduction de la biodiversité des oiseaux mises en évidence dans ce travail sont les pesticides (42%) et, en deuxième position, l'altération et la destruction des habitats (27%). En 2012, 16% des pesticides utilisés sur la planète étaient distribués aux États-Unis, où ils seraient responsables de la mort de 67 à 72 millions d'oiseaux par an.⁴⁴⁴ Au cours des mêmes années, au Canada, les pesticides ont tué au moins 2,7 millions d'oiseaux. Il s'agit probablement de sous-estimations, mais il serait essentiel d'écouter ces signaux alarmants.

Les insecticides qui ont été associés à une mortalité accrue des oiseaux sont les carbamates et les organophosphates. Au Canada, le carbofuran (insecticide à base de carbamate), utilisé dans le colza, serait responsable de la mort de 109.000 à 958.000 oiseaux chaque année.⁴⁴⁴ Aux États-Unis, le même ingrédient actif, utilisé dans la culture du maïs dans les années 1980, serait responsable de la mort de 17 à 91 millions d'oiseaux chaque année. Les effets sublétaux des pesticides sur les oiseaux comprennent la perte de la capacité d'orientation nécessaire à la migration. Chez les passereaux (*Zonotrichia leucophrys*), l'ingestion de quelques graines contenant de l'imidaclopride a également entraîné une diminution du poids corporel. L'ingestion de faibles doses d'insecticides organophosphorés, comme l'acéphate ou le chlorpyrifos, altère la capacité d'orientation, tandis que le carbofuran altère la capacité de thermorégulation, génère une perte de contrôle des mouvements, une paralysie et des spasmes.⁴⁴⁴ L'utilisation des insecticides azinphos-méthyl, dichrotophos (organophosphorés) et carbaryl (carbamates) entraîne une réduction du nombre de déplacements des oiseaux pour nourrir leur progéniture au nid. Ces effets, qui diminuent la capacité de survie et de résistance aux prédateurs, ont également été enregistrés chez les abeilles.

Il est utile de rappeler que de nombreuses espèces d'oiseaux construisent leurs nids sur le sol, de sorte qu'un manque d'herbe ou des opérations telles que le labourage diminuent le succès de la reproduction. La présence de zones non cultivées avec une végétation spontanée augmente la biomasse d'insectes d'au moins 12 fois par rapport aux monocultures. Par conséquent, les pratiques agronomiques ont également une influence significative sur la biodiversité aviaire et

entomologique. Si au moins 10% de la surface agricole étaient consacrés à des zones non cultivées avec une végétation spontanée, l'agriculture en bénéficierait également.

Après l'examen de la littérature scientifique sur le déclin des oiseaux sur la planète, on peut affirmer que le système actuel de production alimentaire, qui trouve ses fondements dans l'agriculture industrielle chimique, constitue la menace la plus importante pour la capacité de survie de centaines d'espèces d'arthropodes, d'oiseaux et autres.

LA DOMESTICATION DU PAYSAGE NATUREL EN ITALIE

Depuis 1990, au moins 239 millions d'hectares de forêts naturelles ont été détruits sur la planète.³⁴⁵ La reforestation artificielle, créée par l'homme pour compenser cette perte, est utile, mais elle entraîne une perte de biodiversité et une homogénéisation génétique des forêts ; les forêts artificielles occupent désormais environ 7% de la surface de la Terre.³⁴⁵ Il est probable qu'avant 2050, un milliard d'hectares occupés par des écosystèmes naturels seront convertis à des fins agricoles et pour répondre à la demande accrue de nourriture.⁶⁰⁴

Au moins deux milliards de personnes tirent leurs besoins énergétiques principalement de la combustion du bois, au moins quatre milliards de personnes obtiennent leurs médicaments directement des plantes et des animaux, environ 70% des médicaments utilisés pour traiter le cancer sont d'origine naturelle ou sont des molécules synthétiques inspirées de molécules naturelles.³³⁹

En Italie, malheureusement, il n'existe aucun endroit comme une forêt qui puisse être considérée comme naturelle, c'est-à-dire avec l'aspect et les composants qu'elle aurait sans l'intervention modificatrice de l'homme.^{737, 748} Le territoire national a été totalement modifié, transformé et dégradé par le travail de quelques centaines de générations. Des siècles de déforestation, de labourage, de mise en valeur des terres, d'incendies, de chasse, d'élevage, d'urbanisation et d'industrialisation ont détruit le patrimoine naturel qui existait avant la domination de l'homme sur la nature. En 6500 avant J.-C., la population de l'Italie était probablement inférieure à 60.000 habitants et le territoire était alors entièrement recouvert de forêts. En 200 après J.-C., il y avait déjà 8,5 millions d'habitants, mais ce chiffre a été réduit à moins de 4 millions en 700 après J.-C., en raison de l'épidémie de peste, importée d'Égypte en 543 après J.-C., et d'inondations dévastatrices ; en 900, la population était encore d'environ 4,5 millions et en 1200, elle est revenue aux chiffres de 200 après J.-C., c'est-à-dire à environ 8,5 millions.⁷³⁷ Par la suite, la population a de nouveau augmenté mais, en raison de la famine et des épidémies, elle avait chuté à environ 8 millions d'habitants en 1400, soit le même nombre que 1000 ans auparavant. En 1650, elle était estimée à 11,5 millions et en 1850 à 25 millions. Pendant des siècles, la population n'a pas augmenté de manière significative mais, malgré la faible population, le territoire a néanmoins été profondément modifié. Comme le paysage agricole, les forêts peuvent être considérées comme un artefact, ayant été entièrement façonnées par le travail de l'homme. Au XVI^e siècle, le territoire forestier de l'Italie avait déjà été réduit de 90% à l'époque préhistorique à 50%.⁷³⁷

Aujourd'hui, en Italie, il n'y a plus de forêts naturelles, mais plutôt des forêts qui ont repoussé sur des terrains abandonnés ou des forêts dont la gestion a été interrompue. Les phénomènes récents de reforestation naturelle ou artificielle ont déclenché de nouveaux processus, qui ne sont pas toujours souhaitables d'un point de vue écologique, tels que la propagation d'espèces exotiques ou de plantes sélectionnées artificiellement par l'innovation technologique. Cette perte est irréversible, elle assèche la sphère culturelle et appauvrit la sphère sociale : une mémoire historique est également perdue.

Depuis plusieurs millénaires, l'harmonie naturelle de la forêt a été modifiée par l'homme, à tel point qu'au cours des premiers siècles de notre ère, il aurait déjà été très difficile de trouver des

forêts vierges en Italie. ⁷⁴⁸ Des études paléobotaniques ont montré qu'en Italie centrale, vers 1000 avant J.-C., le pollen de châtaignier représentait 8% de la flore arborescente totale. Grâce à l'intervention de l'homme, au début de l'ère chrétienne, ce pourcentage est passé à 48% : au 15e siècle, les châtaignes étaient encore utilisées comme moyen de paiement, au même titre que le blé. Ces informations confirment le rôle de la civilisation romaine dans le façonnement de la nature.

Jusqu'à la Seconde Guerre mondiale, la majeure partie du paysage rural était également constituée de forêts. Les exploitations agricoles ne pouvaient exister sans la forêt et étaient basées sur la polarisation et la rotation sur de petites parcelles. La transition, qui a eu lieu principalement au cours du siècle dernier, d'une agriculture solaire, c'est-à-dire tendant à être autosuffisante en matière de consommation d'énergie mais avec une productivité relativement faible, vers une agriculture utilisant une énergie externe, principalement des combustibles fossiles, a marqué le déclin des forêts et de l'agriculture mixte dans les basses terres.

Les forêts italiennes ont augmenté au cours du siècle dernier en raison de l'abandon : elles ont une extension d'environ 0,21% des forêts de la planète ; environ 35% du territoire national est montagneux et 23% est occupé par des plaines. ⁷⁴⁸ L'Italie n'est pas autosuffisante en matière d'alimentation (elle en importe la majeure partie), pas plus qu'elle n'est autosuffisante en matière de bois, puisque 85% de celui-ci provient de l'étranger. L'Italie ne dispose pas de suffisamment de terres pour répondre aux besoins nationaux : pour chaque habitant, il y a environ 5.000 mètres carrés de terres, dont seulement 1.500 sont cultivés ; une extension similaire est constituée de forêts et la partie restante est constituée de zones plus ou moins urbanisées ou dégradées. Si nous essayons d'estimer la tendance actuelle pour l'avenir, une situation très inquiétante se dessine : la demande de terres augmente, mais la superficie disponible diminue.

Les estimations présentent de nombreuses faiblesses car, par exemple, on ne sait pas ce que l'on entend par *forêt*, tous les types n'étant pas équivalents en termes de services qu'ils peuvent rendre, comme la protection de la biodiversité : peut-on considérer comme une forêt des plantes équiennes, d'une même variété sélectionnée artificiellement par l'homme, avec un niveau homogène de couverture et de densité, cultivées exclusivement en montagne ? Quel est le niveau minimal de couverture terrestre et de biodiversité qu'un ensemble d'arbres et d'autres plantes doit avoir pour être considéré comme une forêt ? Il est probable que de nombreuses zones couvertes d'arbres ne peuvent pas être incluses dans le concept de forêt (par exemple, la culture de peupliers, qui, par ailleurs, pourrait être réalisée avec des plantes génétiquement modifiées ; par exemple, celles qui ont été modifiées de manière à ne pas produire de graines avec un système de diffusion dans l'air, qui sont considérées comme gênantes).

La forêt a été modifiée à des fins diverses : pour obtenir du bois de chauffage, pour avoir des matériaux de construction, pour obtenir de la nourriture (par exemple des châtaigniers) ou pour pouvoir élever des animaux pour le pâturage. Le besoin de bois pour la construction a modifié la proportion naturelle de conifères et de feuillus en faveur des premiers. Les feux allumés pour créer des pâturages ont également favorisé les plantes résistantes au feu comme l'arbousier et certains conifères (appelés pyrophytes). Pendant des siècles, la forêt était synonyme de pâturage, mais depuis moins de 100 ans, le pâturage est devenu un ennemi de la forêt. La combinaison du feu et du pâturage a favorisé, au fil du temps, des plantes plus résistantes au feu et aux morsures des herbivores. Dans le passé, certains types de forêts clairsemées étaient utilisés pour le pâturage des porcs se nourrissant de glands (par exemple, les chênes).

Le bois était utilisé pour produire du charbon de bois afin d'atteindre les hautes températures nécessaires à divers processus tels que la fusion des métaux et des céramiques. Le processus est énergétiquement défavorable car il faut au moins 5 kg de bois (environ 17.500 kcal) pour obtenir un kilogramme de charbon (fournissant 7.500 kcal). L'avantage est que le charbon est une forme d'énergie plus concentrée et plus facile à transporter ; il permet également d'atteindre

des températures de combustion plus élevées, qui sont essentielles pour certains types de transformation comme les métaux.

L'exploitation forestière à des fins militaires a une longue histoire. En 256 avant J.-C., une guerre entre les Romains et les Carthaginois est documentée, au cours de laquelle les Romains ont utilisé 160 navires. Lors d'une bataille ultérieure, ils ont utilisé 330 navires. Pour disposer d'une grande flotte navale, il était nécessaire de gérer des forêts d'où l'on pouvait tirer le bois nécessaire. C'est pourquoi, depuis l'Antiquité, la nécessité de protéger les forêts pour diverses raisons telles que l'armée, la production de charbon de bois ou la construction est apparue.

Les villes dépendaient également des forêts : on a calculé que les fondations de Venise provenaient d'au moins vingt mille hectares de forêt.⁷³⁷

La déforestation des collines et des montagnes provoque de graves perturbations hydrogéologiques dont les coûts sociaux sont énormes. La forêt est le moyen le plus efficace de consolidation et de protection des terrains exposés à l'érosion météorique.

En 1530, des mesures ont été prises en Italie pour réduire la déforestation et restaurer les forêts, comme l'obligation de reboiser au moins 8% des terres défrichées au cours des 40 années précédentes. Entre 1600 et 1700, la peine de mort a été imposée pour protéger certaines forêts italiennes. Des mesures similaires seraient probablement nécessaires pour protéger la biodiversité aujourd'hui. Afin de réduire le taux actuel de dégradation, il serait utile d'organiser la distribution gratuite de plants pour le reboisement et d'impliquer la population et les écoles. Comme par le passé, les réglementations et les subventions agricoles pourraient encourager la plantation d'arbres dans les exploitations agricoles, comme celles situées dans les plaines, et dans les villes.

CHASSE EN ITALIE

L'homme a commencé à manipuler et à modifier les écosystèmes d'une manière très apparente pour la paléontologie il y a plus de 10.000 ans. Il y a 50.000 ans, il existait au moins 150 genres d'animaux appartenant à la mégafaune, c'est-à-dire des animaux pesant plus de 44 kg. Il y a 10.000 ans, lorsque la colonisation humaine des continents a pris fin et que le climat s'est stabilisé sur des régimes plus doux, 100 de ces genres ont disparu, et au moins 180 espèces animales se sont éteintes.⁶⁹³ Les animaux plus lourds ont disparu bien plus tôt, par exemple en Australie, il y a 40.000 ans, les animaux pesant plus de 100 kg avaient déjà complètement disparu. En Amérique du Nord, les mammifères pesant plus de 1.000 kg ont complètement disparu il y a plus de 11.500 ans.⁷⁰³ En Amérique du Sud, il y a environ 12.000 ans, 70% des animaux pesant plus de 40 kg ont disparu avec l'arrivée des humains. À Madagascar, après la colonisation il y a environ 1.500 ans, tous les animaux de plus de 44 kg ont disparu à jamais.⁹⁷⁷

Probablement à l'époque où les premières extinctions dues à l'homme ont commencé à être enregistrées, le nombre d'habitants de la planète était tout au plus de quelques millions. La paléontologie a démontré que la disparition des grands mammifères a immédiatement suivi l'apparition de l'homme. Surtout sur les îles, la coïncidence est très évidente et indiscutable. En un temps géologique très court, l'espèce humaine a monopolisé la biomasse et l'énergie de la planète. La capacité d'intervenir dans la dynamique naturelle s'est accrue d'un facteur tout simplement étonnant.

Les animaux que nos ancêtres en Italie ont pu observer sont les crustacés et les mollusques d'eau douce, le castor et la loutre dans les lacs et les rivières, l'élan, le lynx, le bison, l'ours, le pélican, grues, vautours percnoptères, gypaètes barbus, vautours fauves, vautours moines, outardes, cigognes noires et blanches, francolins, poulets sultans, ibis ermites, cailles à trois doigts, phoques moines et tortues de mer. Malgré la destruction de la plupart des espaces sauvages, l'Italie compte actuellement plus de la moitié des espèces végétales (au moins 5.500 espèces)

recensées en Europe, ainsi qu'un certain nombre d'espèces d'oiseaux que l'on ne trouve pas dans les autres pays européens.

La chasse a également généré de nombreux problèmes. Selon les données de l'ISTAT, les chasseurs titulaires d'un permis de chasse en Italie représentent actuellement 1,2% de la population, soit un total de 760.000 personnes.⁸³⁰ Le record de chasseurs en Italie a probablement été atteint en 1973 : 2.370.024 permis, avec une densité de 7,3 tireurs par kilomètre carré, soit un pour 17 hectares. À l'époque, les fabricants de cartouches affirmaient qu'au moins un milliard de coups de feu étaient tirés chaque année en Italie, ce qui signifiait probablement qu'au moins 100 millions d'animaux étaient tués chaque année. Les victimes de la chasse italienne sont la perdrix italienne, le poulet sultan, le vautour fauve, le vautour moine, le gypaète barbu, l'aigle marin, le balbuzard pêcheur, le bossu rouillé, le vautour percnoptère, l'aigle de Bonelli, la mouette corse, le phoque moine, l'esturgeon, l'écrevisse, le daim, la loutre, le mouflon, le cerf sarde, le lynx, le loup et l'ours. Il y a 48 espèces chassables en Italie et chaque chasseur a la possibilité de chasser un nombre maximum d'animaux par jour de chasse (nombre quotidien) et un nombre maximum par saison (nombre saisonnier). Sur la base du nombre de chasseurs en Italie, qui est d'environ 700.000, et des carnieri (le registre du nombre d'animaux tués lors d'une chasse) des régions de Vénétie, Lombardie, Sicile et Toscane, 464 millions d'animaux peuvent être tués légalement chaque année.⁸³¹ Le nombre d'oiseaux migrateurs tués chaque année par les seuls chasseurs italiens est d'au moins 150 millions (contre 80 millions en France, 50 millions en Espagne et un million au Danemark).⁸³³ Il s'agit d'estimations qui ne tiennent pas compte du braconnage et d'autres facteurs tels que la chasse par dérogation. Au moins 25 millions d'oiseaux sauvages sont tués illégalement chaque année dans les pays qui bordent la Méditerranée : l'Italie enregistre également 8 millions de victimes (chaque année) de passereaux et de grands oiseaux de proie.⁸³² Ils sont abattus, pris dans des filets ou collés aux branches. En même temps, des milliers de tonnes de plomb sont dispersées dans l'environnement (chaque année) sous forme de plombs : un déluge de fragments toxiques ; sans parler du plastique des coquilles qui ne sont pas ramassées par les chasseurs, qui seraient obligés de le faire. En Italie, si les 700.000 chasseurs enregistrés se répartissaient dans tout le pays, y compris dans les villes, les lacs, les rivières et les montagnes, chaque kilomètre carré en abriterait six.

Les animaux sauvages étaient massacrés dans le passé et la chasse était fatale pour de nombreuses espèces. Quelques événements représentatifs peuvent être rappelés : l'empereur Gordien Ier (157-238 après J.-C.) offrait à la population romaine 1.000 ours, 150 sangliers, 100 chèvres sauvages, 200 cerfs, 200 bouquetins et 200 chevreuils (ainsi que de nombreux animaux africains) à abattre lors de spectacles au Colisée. Des carnages étaient également perpétrés dans les petites villes lors de fêtes : en 249 après J.-C., dans une ville d'Italie centrale, 40 ours et 16 cerfs et chevreuils ont été tués lors d'une fête.⁷³⁷

Dans le Val d'Aoste se trouve le château de Sarre, qui domine l'accès à la haute vallée depuis une colline surplombant le bassin d'Aoste. Dans la Galerie des trophées de chasse et dans la Salle du Grand Jeu, on trouve des compositions de trophées de chasse savoyards : les murs et les plafonds sont entièrement recouverts de 3.612 cornes, provenant de mille bouquetins et de près de huit cents chamois (tués dans la seconde moitié des années 1800).¹²⁷⁹

LES POLLINISATEURS EN ITALIE

Au moins 85 espèces d'amphibiens, 151 espèces de reptiles, 489 espèces d'oiseaux, 546 espèces de poissons d'eau douce, 25.000 espèces de plantes (plantes vasculaires) et 100.000 espèces d'invertébrés (dont 482 espèces de papillons, dont 264 espèces se trouvent également en Italie) ont été classées en Europe.⁴²⁴ Au total, 57.468 espèces ont été recensées en Italie.⁵ 97,8% de la richesse faunistique de notre pays est composée d'invertébrés (par exemple 45.888 arthropodes et 2.141 mollusques).

Un recensement des insectes pollinisateurs sauvages effectué sur 52 sites dans 8 régions italiennes en 1997-2000 a permis d'enregistrer la présence de 355 espèces, dont trois ont été enregistrées pour la première fois.⁶⁸⁵ 75% des espèces capturées et classées ont été collectées dans des agro-écosystèmes. Cette biodiversité est très importante pour l'écosystème agricole. Parmi les espèces qui sont également élevées, citons le bourdon (*Bombus terrestris*), qui est utilisé pour polliniser les tomates dans les serres, l'abeille solitaire (*Megachile rotundata*), qui joue un rôle important en tant que pollinisateur des cultures de luzerne (*Medicago sativa*), et d'autres espèces d'abeilles solitaires (du genre *Osmia*), qui sont utilisées aux États-Unis pour polliniser certaines plantes fruitières. Lors de ce recensement italien, 13 espèces du genre *Bombus* ont été enregistrées, dont *Bombus terrestris*. Un autre recensement réalisé en Italie, entre 2001 et 2006 dans la Val Susa, a permis d'enregistrer la présence (dans le bassin versant du fleuve Pô, situé dans le Piémont et en partie en France) de 30 espèces différentes de bourdons (240 espèces ont été classées dans le monde, dont 43 en Italie).⁶⁸⁹ Cette zone, la vallée de Suse, contient donc 70% des espèces de bourdons connues en Italie. Huit des trente espèces de bourdons étudiées étaient dominantes, chacune représentant plus de 5% des captures. Un résultat intéressant rapporté dans cette publication est que différentes espèces de bourdons montrent des préférences concernant les plantes qu'ils visitent. Certaines plantes ne sont visitées que par une seule des huit espèces les plus fréquentes (par exemple, les plantes des familles Rosaceae, Caryophyllaceae et Geraniaceae), tandis que d'autres sont pollinisées par les huit espèces dominantes (par exemple, les plantes du genre *Trifolium*). Trois espèces de bourdons qui avaient été recensées lors de précédentes enquêtes n'ont pas été enregistrées dans cette étude et les auteurs concluent que des changements, tels que le changement climatique, peuvent réduire la présence de plantes importantes pour certains de ces insectes.⁶⁸⁹

La réduction des espèces de bourdons a également été enregistrée dans d'autres pays d'Europe. C'est probablement au Royaume-Uni, en 1988, que l'on a enregistré pour la dernière fois un spécimen de *Bombus subterraneus*, qui s'est éteint en raison de la disparition des habitats et des fleurs.⁶⁸⁸ Cependant, cet insecte avait été introduit artificiellement en Nouvelle-Zélande, dans des zones où des forêts inadaptées à ces bourdons avaient été éteintes. Cette histoire nous rappelle que la destruction de l'écosystème d'origine au Royaume-Uni a provoqué l'extinction d'un bourdon, mais que le transport artificiel vers un autre endroit (la Nouvelle-Zélande), où l'écosystème naturel d'origine a également été détruit, a permis de sauver cette espèce de bourdon. Malheureusement, certaines espèces de bourdons ont été documentées comme étant éteintes dans le monde entier (par exemple, *Bombus franklini*, *Bombus rubriventris* et *Bombus melanopoda*).⁶⁸⁸

La réduction de la biodiversité est un phénomène très grave, et pas seulement dans le domaine des pollinisateurs. Un aspect largement sous-estimé est que notre destin est lié à celui des autres animaux et, en général, à celui des autres êtres vivants. Aujourd'hui, on estime que le taux d'extinction dû aux activités humaines est, en général, 100 à 1.000 fois plus rapide que le taux enregistré dans l'histoire de l'évolution au cours des 10 derniers millions d'années : au moins une espèce toutes les 20 minutes est détruite à jamais par les activités humaines (entre 50 et 200 espèces par jour). Pour se faire une idée de l'extermination en cours, on peut dire que le nombre

d'espèces qui auront disparu entre l'an 2000 et avant la fin du siècle sera supérieur à celui des espèces qui ont disparu au cours des dizaines de millions d'années précédentes. La particularité de cette extinction massive est qu'elle est très rapide et qu'elle est générée par une seule espèce, devenue un parasite super efficace et qui sera donc la victime de ce dépeuplement : l'espèce humaine.

LES COMPÉTITIONS ARTIFICIELLES ENTRE POLLINISATEURS

Un aspect peu étudié est la compétition entre les pollinisateurs. L'arrivée soudaine de millions d'abeilles à proximité d'un verger, en ville ou dans une forêt produit des déséquilibres. Les abeilles étant aidées artificiellement par l'homme, elles sont plus compétitives et les rares ressources naturelles, en termes de pollen et de nectar, sont prélevées au détriment des espèces sauvages : la réduction de la croissance et de la reproduction des espèces de bourdons et d'autres abeilles sauvages (par exemple *Bombus impatiens* et *Osmia bicornis*) due à l'apiculture a été enregistrée.¹¹⁷¹ Il existe peu d'informations sur la concurrence avec les espèces pollinisatrices indigènes : il existe des dizaines de milliers d'abeilles sauvages, et il est impossible d'attendre que la recherche scientifique apporte des réponses définitives pour un nombre énorme de combinaisons possibles. En outre, il existe également des interactions non compétitives, telles que l'altération de la composition florale au fil du temps. Il n'est pas facile de prédire comment les insectes d'élevage modifient la biodiversité végétale, surtout dans les environnements faiblement anthropisés. Un autre aspect est la possibilité que les insectes d'élevage transmettent des maladies à d'autres insectes et plantes. À leur tour, les insectes élevés pourraient recevoir de nouveaux agents pathogènes. À long terme, la précaution permettra de sauvegarder les espèces sauvages, mais aussi les apiculteurs et les agriculteurs.

Un exercice intéressant consiste à essayer d'estimer dans quelle mesure les abeilles domestiques peuvent affecter les ressources alimentaires dont les insectes sauvages ont également besoin : le pollen et le nectar. Il s'agit d'estimer combien d'animaux, qui se nourrissent de pollen et de nectar, peuvent être entretenus par un champ cultivé, une zone naturelle ou une zone semi-naturelle. Nous savons que pendant la courte période de floraison, un hectare de verger peut facilement accueillir entre 3 et 5 ruches. Cette capacité de soutien ne dure que quelques semaines par an et est possible grâce à l'intervention artificielle de l'apiculteur et de l'agriculteur ; les floraisons des monocultures sont synchronisées sur de grandes surfaces. Nous savons également que la surface agricole utilisée en Italie est d'environ 10 à 12 millions d'hectares, selon les années, et que la surface couverte par les forêts est à peu près de la même taille, soit environ 11 millions d'hectares. Les vergers, en Italie, occupent une superficie de moins de 300.000 hectares, les céréales au moins 2,5 millions d'hectares, 500.000 hectares sont occupés par des plantes oléagineuses (soja, colza), 4 millions d'hectares sont des prés et des pâturages, la vigne occupe au moins 700.000 hectares et les olives environ 1,2 million d'hectares.⁸³⁸ Comme on peut le constater, de très grandes superficies sont peu importantes pour les pollinisateurs tels que les abeilles (oliviers, vignes, blé), ou ne constituent une source de nourriture pour les insectes que quelques semaines par an (vergers). Il en va de même pour les forêts et les zones naturelles. Par conséquent, les floraisons disponibles en Italie, en supposant qu'elles puissent être exploitées efficacement et constamment par les apiculteurs, au détriment des animaux sauvages, ne sont pas en mesure de soutenir la production de miel, qui en Italie est réalisée par au moins 1,4 million de ruches (ce sont les ruches enregistrées). La surface nationale couverte de fleurs, disponible pour les abeilles entre la fin de l'hiver et le début de l'automne, varie entre moins d'un tiers et moins d'un quinzième de la surface cultivée, selon la période, le lieu et la saison. C'est l'une des raisons pour lesquelles les abeilles doivent être nourries

artificiellement avec des aliments à base de sucre et des sources de protéines autres que le pollen, et pourquoi le nomadisme est nécessaire. Il n'est pas possible de maintenir le nombre d'insectes élevés avec les fleurs potentiellement disponibles, sans faire de nomadisme et sans fournir de nourriture.

Nous pouvons essayer de calculer la pression exercée par les abeilles d'élevage sur les animaux tels que les insectes sauvages. Une ruche au printemps peut accueillir plus de 60.000 abeilles, dont 20.000 pourraient être des butineuses, c'est-à-dire des abeilles qui recherchent du pollen et du nectar. Supposons, pour simplifier, que dans chacune des plus de 1,4 million de ruches au printemps et en été, il y a 10.000 abeilles butineuses. Chacune de ces abeilles ouvrières peut visiter plus de 3.000 fleurs par jour, mais pour rendre les calculs plus réalistes, supposons qu'elles soient capables de vider 100 fleurs par jour de leur nectar. Ce calcul théorique montre que chaque ruche pourrait épuiser plus d'un million de fleurs par jour en nectar et en pollen (100 fleurs/abeille/jour x 10.000 abeilles butineuses/arnia), ce qui en priverait les autres insectes. Si nous supposons une densité de 10 fleurs par mètre carré (100.000 fleurs avec du nectar et du pollen disponibles par hectare), cela signifie que chaque ruche est capable de s'approprier la nourriture présente dans plus de 10 hectares chaque jour.

En supposant une densité moyenne de 10 fleurs par mètre carré (100.000 fleurs avec nectar et pollen disponibles par hectare), cela signifie qu'une zone de floraison d'au moins 14 millions d'hectares doit être disponible chaque jour (au printemps et en été) pour nourrir toutes les abeilles élevées en Italie. Deux ruchers de 20 ruches chacun, placés dans une forêt dont la densité moyenne théorique est de 10 fleurs par mètre carré, épuisent chaque jour 200 hectares de nectar. Ces données sont inexactes mais certainement sous-estimées, car les abeilles butineuses sont beaucoup plus nombreuses, certaines fleurs ne produisent pas de nectar ou ne sont pas attractives pour d'autres raisons (par exemple, elles ne sont pas adaptées à la longueur de la langue de l'abeille), la densité des fleurs pendant la majeure partie de l'année est beaucoup plus faible que celle estimée (10 fleurs par mètre carré, tous les jours pendant les 6 - 7 mois de plus grande activité des abeilles). En conclusion, pour nourrir toutes les colonies d'abeilles mellifères d'Italie, sans utilisation de nourriture mais par l'apiculture nomade, il faudrait une surface beaucoup plus grande que celle disponible, au moins trois fois plus grande. Sans l'apport d'aliments et sans le nomadisme, les zones agricoles et semi-naturelles italiennes pourraient accueillir plus de 10 fois moins de ruches qu'actuellement. Il est clair que le nombre élevé d'abeilles d'élevage contribue à réduire la possibilité de nourrir les insectes sauvages, car les ressources telles que le nectar sont limitées. Ce raisonnement théorique et provocateur est cependant utile comme prémisse à la conclusion qu'il est impossible, malgré la possibilité offerte par le nomadisme, de produire les quantités actuelles de miel sans utiliser d'aliments pour animaux. Il ne faut pas oublier que le miel constitue l'alimentation de la colonie pendant les mois d'hiver, lorsque la colonie ne quitte pas la ruche. Cette réserve de nourriture, essentielle à la survie, est prélevée par les apiculteurs, et c'est l'une des raisons pour lesquelles l'utilisation d'aliments pour animaux devient un élément essentiel de l'activité.

Il faut considérer que les ressources florales doivent également être disponibles pour les insectes sauvages. À ce stade, nous pouvons nous demander quel pourcentage de la récolte effectuée par les abeilles d'élevage peut être maintenu, par un système plus ou moins artificiel, sans porter atteinte de manière irréversible aux autres pollinisateurs et aux animaux qui utilisent le pollen, le nectar et le miellat. Dans quelle mesure les abeilles d'élevage influencent-elles l'équilibre des plantes dans les écosystèmes naturels et semi-naturels, en favorisant les espèces qu'elles pollinisent ? Chaque fois que l'on place des ruches, surtout lorsqu'il y a des zones de plantes sauvages ou spontanées, il faut essayer de répondre à ces questions. La concurrence alimentaire artificielle que l'apiculture génère contre les pollinisateurs sauvages favorise leur réduction et leur extinction. En outre, les abeilles transportent et propagent des maladies aux plantes et aux insectes sauvages. Malheureusement, nous n'avons pas de réponses concluantes, mais

L'application du principe de précaution pourrait éviter d'attendre d'avoir les connaissances souhaitées lorsqu'il n'y aura plus de retour en arrière.

Nous devons savoir quel est le niveau maximal de concurrence alimentaire que les zones naturelles et semi-naturelles ou les zones importantes pour la biodiversité peuvent tolérer sans subir de changements irréversibles. L'apiculture introduit dans les écosystèmes naturels un système de reproduction artificiel qui est étranger : les ruchers sont donc des étrangers, soudainement transplantés et continuellement déplacés d'un habitat à l'autre sans tenir compte des effets. Le nomadisme et la libre circulation des apiculteurs, quelle que soit la densité sur le territoire, sont aujourd'hui tolérés. Bien que le nomadisme génère des dommages écologiques potentiels dans les zones naturelles et semi-naturelles, il ne suffit pas d'éviter l'utilisation d'aliments pour animaux par les apiculteurs. La fraction du miel provenant des aliments pour animaux est probablement beaucoup plus élevée que nous ne l'imaginons. Comme nous l'avons déjà mentionné, le miel est la nourriture que la colonie utilise pendant les longs mois d'hiver, lorsqu'elle ne quitte pas la ruche. Par conséquent, la soustraction de miel doit être compensée par l'utilisation de nourriture, même si les fleurs sont présentes en abondance. En conclusion, les abeilles vivent dans une maison artificielle, elles n'ont plus besoin de produire de la cire avec les glandes qu'elles possèdent car l'apiculteur la régénère en construisant des cellules artificielles, elles se déplacent dans des véhicules, même sur plusieurs kilomètres par semaine, elles doivent nécessairement être nourries avec des aliments et sont traitées avec le soutien de vétérinaires qui prescrivent des acaricides, des fongicides et d'autres médicaments ; les reines d'abeilles peuvent être sélectionnées et reproduites par insémination artificielle et peuvent être achetées en consultant une sorte d'arbre généalogique (il existe un commerce de liquide séminal pour l'insémination assistée).⁶⁷⁰ La technique d'insémination artificielle a été conçue en 1926 mais n'a été perfectionnée qu'en 1940 ; les spermatozoïdes des bourdons peuvent être conservés à température ambiante (15-25°C, ils sont gravement endommagés par des températures inférieures à 10°C) pendant une quinzaine de jours, de sorte qu'ils peuvent facilement faire le tour du monde, bien qu'avec la cryoconservation (à -196°C avec l'ajout de cryoprotecteurs) ils puissent être conservés beaucoup plus longtemps (les reines peuvent être inséminées dans une fenêtre temporelle de quelques jours : entre le jour 5 et le jour 10, les meilleurs résultats sont obtenus).⁹⁷⁴

L'alimentation est basée sur le sucre, qui peut être dérivé de la canne à sucre, de la betterave, mais aussi de sirops fabriqués à partir de maïs, de riz ou d'autres végétaux. L'apiculture moderne ne diffère donc pas de l'élevage intensif, puisqu'elle nécessite également la culture d'aliments de remplacement du nectar. L'apiculture nécessite également l'élevage d'animaux comme source de nutriments essentiels, tels que les protéines de remplacement du pollen ; les limites de l'exploitation économique devraient être acceptées et la protection de la biodiversité naturelle devrait être réglementée de manière plus consciente.

Des informations sur les espèces exotiques peuvent être trouvées sur de nombreux sites web spécialisés.⁵⁶⁶ Pour la plupart des espèces exotiques, il n'est pas facile d'estimer les effets néfastes sur l'écosystème, sans parler des coûts impliqués. Il est raisonnable de supposer que l'introduction d'insectes pollinisateurs exotiques, tels que les abeilles domestiques et les bourdons, dans de nouveaux écosystèmes, comme c'est le cas depuis des décennies, générera divers problèmes :

- 1) Réduction de la disponibilité du miellat, du pollen et du nectar comme source de nourriture pour les espèces indigènes. Dans certaines régions du monde, les insectes indigènes ainsi que les oiseaux et d'autres animaux se nourrissent de ces substances. L'apiculture crée des densités artificielles et impensables d'insectes élevés, générant une concurrence et une pression artificielle nuisibles aux insectes sauvages et autres. À titre d'illustration, il est bien connu que les bourdons ont tendance à être plus petits en présence de ruchers en raison de la concurrence pour les ressources alimentaires.⁶⁸⁸

- 2) Réduction de la pollinisation des plantes indigènes et, par conséquent, de la reproduction car, par exemple, les bourdons peuvent voler le nectar par un trou au lieu de pénétrer dans la fleur ; ils le font lorsqu'ils ne peuvent pas atteindre le nectar parce que leur langue est trop courte et n'est pas adaptée à ce type de fleur. La fleur perd son attrait pour les espèces sauvages adaptées pour entrer dans la fleur et, par conséquent, perd du nectar sans être pollinisée.
- 3) Encourager la pollinisation et la propagation des fleurs non indigènes qui peuvent être originaires d'Europe. En pollinisant, les bourdons favorisent la propagation des plantes qu'ils préfèrent (par exemple, le lupin, le colza, les haricots). C'est l'objectif naturel de la symbiose entre la plante et le pollinisateur. Chaque pollinisateur, par son activité, va favoriser la propagation des plantes pour lesquelles il transporte du pollen.
- 4) Favoriser la propagation des maladies. La propagation peut se faire dans les deux sens, des abeilles domestiques exotiques aux abeilles sauvages indigènes et vice versa. Ainsi, avec l'apiculture nomade, les agents pathogènes ne tardent pas à faire le tour du monde. Les abeilles domestiques peuvent également favoriser la propagation de maladies entre les plantes.

La propagation incontrôlée d'espèces utiles à l'homme, comme les abeilles d'élevage, réduit la biodiversité et accroît les problèmes, y compris pour les apiculteurs. Le nomadisme a favorisé la propagation des principales maladies des abeilles à travers la planète.

Un aspect intéressant à souligner concernant l'apiculture est que certains des miels monofloraux les plus importants sont obtenus à partir d'espèces importées en Italie, comme les agrumes, l'eucalyptus, le robinier ou l'acacia, le tournesol et le néflier. Par exemple, l'eucalyptus est une plante originaire d'Australie, introduite en Italie au début des années 1900 à des fins de reforestation. La croissance rapide a conduit à la propagation de l'eucalyptus comme brise-vent dans les zones côtières, comme espèce ornementale, pour l'industrie du papier, et comme huile essentielle utilisée dans les industries chimiques et pharmaceutiques. Certaines espèces exotiques aident les apiculteurs à maintenir des avantages économiques. Le miel de miellat bénéficie également d'une espèce exotique : l'insecte *Metcalfa pruinosa* (Rhynchus homoptera), originaire d'Amérique du Nord et d'Amérique centrale, qui a été introduit accidentellement en Italie. Depuis 1979, date à laquelle il a été signalé pour la première fois, le parasite s'est progressivement propagé vers le sud, grâce à l'absence d'antagonistes et, surtout, à sa polyphagie, qui lui permet de vivre sur un grand nombre d'espèces végétales, tant spontanées que cultivées.

L'introduction d'insectes pollinisateurs domestiqués (par exemple *Apis mellifera* et *Bombus terrestris*) là où ils n'existaient pas, comme en Amérique du Sud et dans d'autres endroits de la planète dotés de ressources naturelles uniques et importantes, aura des effets que nous ne pouvons que partiellement imaginer : la propagation de maladies et de parasites, la concurrence pour les ressources et la réduction de la biodiversité.⁷⁵⁸

LES ÉCOSYSTÈMES MENACÉS PAR L'INTRODUCTION D'ESPÈCES ÉTRANGÈRES

ESPÈCES ALIENNES

La propagation volontaire ou involontaire d'espèces dans de nouveaux écosystèmes est probablement la deuxième cause d'extinction massive sur la planète, après la destruction des écosystèmes naturels due à la croissance démographique et à la consommation. Aux États-Unis, sur les 958 espèces indigènes menacées d'extinction, 400 sont menacées par la concurrence des espèces introduites artificiellement.⁶⁹⁸ Le processus de manipulation et de mélange de la flore et de la faune de la planète, qui a commencé il y a des milliers d'années le long des routes migratoires humaines, s'est accéléré au cours des dernières décennies au point que, dans certaines régions du monde, les plantes non indigènes sont plus nombreuses que les plantes indigènes. Les déplacements par pneus, bateau et avion annulent des millions d'années de séparation géographique. Une expérience, sans précédent dans l'histoire de la Terre, est en cours pour normaliser et simplifier les écosystèmes.

Toutes les nations comptent des milliers d'espèces non indigènes. Les espèces exotiques entrent en concurrence avec les espèces indigènes et peuvent les faire disparaître par divers mécanismes tels que la prédation, l'hybridation, la propagation de maladies et le détournement de ressources alimentaires. La propagation artificielle d'espèces non indigènes est non seulement un problème écologique, mais aussi un problème pour notre santé.⁸⁰⁶ Les espèces non indigènes peuvent favoriser plusieurs maladies dangereuses pour l'homme, comme la malaria.

Un exemple bien connu de désastre écologique consécutif à l'introduction d'une nouvelle espèce est celui de la perche du Nil (*Lates niloticus*) relâchée dans le lac Victoria dans les années 1960. En quelques années, au moins 200 espèces de poissons (cichlidés) ont disparu à cause de l'introduction de cette nouvelle espèce.¹¹⁴⁷

Aux États-Unis, on dépense au moins 138 milliards de dollars par an pour lutter contre les espèces envahissantes, avec des résultats qui ne sont pas toujours satisfaisants. Malheureusement, le problème de l'invasion de nouveaux écosystèmes par des espèces considérées comme exotiques ne risque pas de s'atténuer.¹¹⁴⁸

Il n'est pas toujours facile de déterminer quelle espèce est envahissante et quelle espèce est indigène : il peut y avoir plusieurs obstacles. Tout d'abord, nous ne disposons pas d'informations suffisantes pour de nombreuses espèces, comme certains invertébrés, plantes, micro-organismes, de nombreux habitants des océans et des sols. Il est également difficile de déterminer jusqu'où il faut remonter pour savoir si une espèce bien adaptée à un écosystème est indigène ou envahissante. L'homme a commencé à manipuler l'environnement à son profit il y a des milliers d'années. Avec l'agriculture et l'élevage, les espèces utiles aux besoins de l'homme ont été favorisées il y a déjà plus de 5000 ans. En raison de la difficulté de savoir ce qui s'est passé il y a des millénaires, il convient dans de nombreux cas de parler d'espèces indigènes probables ou d'espèces introduites artificiellement possibles. Par exemple, dès l'époque romaine, des espèces telles que l'érable sycomore (*Acer pseudoplatanus*), également appelé sycomore, et une plante herbacée vivace (*Aegopodium podagraria*) ont été introduites au Royaume-Uni.⁶⁹⁸ Les Romains ont introduit le lièvre, le rat et le daim européens au Royaume-Uni. Les changements, cependant, ont commencé bien avant l'arrivée des Romains. La folle avoine (*Avena fatua*) avait déjà été introduite au Royaume-Uni il y a 3000 ans et, pendant la Première

Guerre mondiale, une autre espèce d'avoine (*Avena sterilis*) a été introduite à grands frais. Certaines des espèces introduites se sont si bien adaptées qu'elles constituent une grande partie des espèces présentes. En Grande-Bretagne, les 22 espèces de mammifères introduites artificiellement représentent 46% des 48 espèces terrestres existantes. Les 8 espèces d'amphibiens enregistrées comme introduites artificiellement représentent 57% des 14 espèces présentes.⁶⁹⁸ Comme le confirment ces chiffres, les espèces exotiques représentent, dans certains cas, une fraction importante des espèces présentes et sont en concurrence avec les espèces indigènes. Dans le cas de la Grande-Bretagne, si l'on remonte beaucoup plus loin, probablement jusqu'à 7000 ans, elle était reliée à l'Europe par la glace (au moins pendant certaines périodes). Certaines espèces terrestres ont pu marcher de l'Europe vers la Grande-Bretagne et vice versa. Certaines espèces se sont éteintes dès cette phase, lorsque l'isolement de la Grande-Bretagne par la mer a commencé (par exemple, le cheval sauvage ou *Equus ferus*).

L'un des principaux dangers des espèces transplantées est qu'elles sont généralement peu nombreuses et présentent donc un degré élevé d'uniformité génétique. Dans les années 1970, une maladie fongique transmise par un insecte (le scolyte) sur les ormes a décimé ces arbres dans toute l'Europe. Certains ormes étaient plus touchés que d'autres, ce qui confirme que la variation génétique joue un rôle dans la sensibilité à la maladie. En Angleterre, une espèce d'orme (*Ulmus procera*) a été presque entièrement décimée. L'analyse génétique a confirmé que l'espèce entière était en fait un seul clone (propagé par boutures), importé il y a deux mille ans par les Romains pour servir de support à la culture de la vigne.⁷⁰⁴ Suite à l'introduction d'un nouvel agent pathogène, l'uniformité génétique de cette plante cultivée a provoqué sa quasi extinction.

L'introduction accidentelle d'espèces non indigènes peut rapidement mettre à genoux des secteurs de production entiers. Au XIXe siècle, un nouveau ravageur de la vigne originaire d'Amérique du Nord a été introduit accidentellement en France : le puceron connu sous le nom de phylloxéra de la vigne (*Daktulosphaira vitifoliae*). Pour lutter contre ce parasite, des vignes européennes ont été greffées sur des porte-greffes américains naturellement résistants. Il est intéressant de remarquer que la viticulture est très ancienne en Italie : on en a retrouvé des traces dans les Abruzzes, qui remontent au IIIe siècle avant Jésus-Christ.⁷⁷³

Les espèces exotiques sont également préjudiciables à l'apiculture, qui, comme nous l'avons déjà mentionné, est confrontée à de nombreux parasites qui ont voyagé dans le monde entier, tels que l'acarien *Varroa destructor* ou le *Vespa velutina*. Un autre exemple est celui de la grenouille originaire d'Amérique centrale (*Bufo marinus*), qui a été volontairement transportée dans d'autres pays (par exemple à Hawaï et en Australie) dans l'espoir de contrôler certains insectes considérés comme nuisibles : cette grenouille est capable d'endommager les colonies d'abeilles.

974

LA VULNÉRABILITÉ DES ÉCOSYSTÈMES À L'INTRODUCTION D'ESPÈCES ÉTRANGÈRES

L'introduction d'une espèce dans les écosystèmes est suivie de sa propagation et de l'établissement de nouveaux équilibres imprévisibles. Au fil du temps, de nouvelles relations écologiques se créent et il devient plus facile d'en mesurer les effets, comme la réduction de la présence d'espèces indigènes. Les espèces exotiques introduites sont définies comme étrangères à cet écosystème. La vulnérabilité d'un écosystème aux espèces introduites artificiellement est influencée par plusieurs facteurs :

- L'isolement favorise l'enregistrement de dommages plus importants (par exemple, sur des îles plutôt que sur des continents).

- Les écosystèmes plus simples, c'est-à-dire ceux qui ne comptent que quelques espèces, sont plus fragiles et moins résistants aux changements. Les écosystèmes complexes, en revanche, sont plus flexibles et capables de résister à des pressions négatives telles que celles résultant de l'introduction d'espèces exotiques. Si les écosystèmes sont simples et isolés, les effets de l'introduction d'espèces exotiques seront encore plus dévastateurs.
- La durée pendant laquelle l'espèce étrangère restera. Plus la durée de la cohabitation artificielle étroite est longue, plus les dommages causés aux espèces indigènes sont importants. À titre d'exemple, au Royaume-Uni, dans le but de lutter contre le nombre de lapins, une maladie, le virus de la myxomatose, a été introduite en 1953. Les premières années, le taux de mortalité des lapins était élevé (plus de 90%), mais après vingt ans de coévolution, le taux de mortalité a été réduit à 50% et à 20% dans les années 1980.⁶⁹⁸ Les pertes de grains dues aux lapins sont estimées à environ 0,5% de la récolte de grains par hectare, par lapin et par an. En Grande-Bretagne, les lapins ont entraîné l'extinction d'au moins une espèce de papillon dans les années 1950, qui est réapparue par la suite (*Maculinea arion*).
- La présence d'autres facteurs de perturbation tels que le changement climatique, la fragmentation de l'habitat causée par l'urbanisation et l'agriculture, l'utilisation de poisons (par exemple, les insecticides) ou les incendies.

Le déplacement des espèces vers des écosystèmes autres que ceux dans lesquels elles se trouvent normalement est l'une des principales causes de la perte de biodiversité, avec la pollution, la destruction des écosystèmes naturels (par exemple, réduction de la fertilité des sols, agriculture, incendies, déforestation), la surexploitation (chasse, pêche, commerce) et le changement climatique. La propagation des espèces exotiques est causée par l'activité humaine, mais peut aussi se produire de manière accidentelle : prévenir ce type de menace environnementale est devenu presque impossible.

INVASION PAR DES ESPÈCES NON INDIGÈNES EN EUROPE

Afin de mieux quantifier l'intensité de l'invasion par des espèces introduites artificiellement, dites espèces exotiques, il est intéressant de rapporter certaines données qui sont certainement des sous-estimations.⁶⁹⁸ Au moins 12.000 espèces exotiques ont probablement été introduites en Europe, dont 88 espèces de mammifères non indigènes, 140 espèces d'oiseaux nicheurs (plus de 197 espèces d'oiseaux ont été introduites depuis 1850 ; moins de 500 espèces d'oiseaux ont été classées dans l'ensemble de l'Europe), 1.590 espèces d'arthropodes dont la majorité sont des insectes (la plupart des insectes ont été introduits accidentellement avec des plantes ornementales).^{424, 699, 810} 20 des 88 espèces de mammifères considérées comme exotiques ont été introduites à partir d'autres régions d'Europe.

Les espèces qui causent le plus de dégâts sont le rat commun (*Mus musculus*), le rat gris (*Rattus norvegicus*), le ragondin (*Myocastor coypus*) et le vison (*Neovison vison*). Certaines espèces comme les rats ont suivi l'homme partout sauf dans les calottes polaires et probablement dans une région du Canada (Alberta). Un rat (*Rattus norvegicus*) peut nager sans s'arrêter pendant 72 heures, faire une chute de 15 mètres sans mourir, escalader un mur ou grimper à une corde, rester plus longtemps sans boire qu'un chameau, manger tout ce qui est comestible (mais aussi beaucoup de choses qui ne le sont pas, comme le bois), atteindre la maturité sexuelle à trois mois et s'accoupler jusqu'à 20 fois par jour. Une femelle peut s'accoupler avec plusieurs mâles en un an et donner naissance à 12 portées de plusieurs petits chacune. La femelle de la souris commune (*Mus musculus*) est également très prolifique : elle peut produire 500 petits en un an. On estime qu'ils consomment une énorme quantité d'aliments destinés à la consommation humaine et sont porteurs de plus de 70 maladies, dont la peste (qui a tué au moins un milliard de

personnes au cours des siècles), le choléra, la typhoïde, la tuberculose, l'hépatite E, la salmonellose et plusieurs espèces de vers parasites.

Au moins 120.000 espèces ont été classées parmi les mouches, dont certaines sont capables de transporter des milliers d'espèces bactériennes différentes (peut-être plus d'un million). La mouche domestique (*Musca domestica*) peut être porteuse de nombreuses maladies telles que la tuberculose, le typhus, le choléra, la dysenterie et divers vers parasites. Dans des conditions appropriées, le cycle de vie de la mouche est très rapide : de l'œuf à l'adulte en moins de douze jours. La *Musca domestica* est l'espèce la plus importante dans l'élevage des animaux. La concentration d'animaux dans les élevages et la grande quantité de fumier créent des conditions favorables à la multiplication des mouches. La présence de ces insectes est une source continue de perturbation pour les animaux, entraînant des pertes économiques (réduction de la production de viande, de lait et d'œufs) et une gêne pour les travailleurs et la population vivant à proximité.

Au moins 688 espèces de champignons exotiques ont été introduites en Europe, dont certaines posent de graves problèmes aux cultures telles que la vigne et la pomme de terre.

Le cerf rouge du Japon (*Cervus nippon*) est capable de se reproduire avec le cerf rouge (*Cervus elaphus*) originaire d'Europe, générant ainsi des hybrides fertiles. L'introduction de ce cerf a généré un nouvel animal hybride et a favorisé la propagation d'une maladie (par exemple le nématode *Aswthius sidemi*) affectant les cerfs et les chevreuils. Certaines oies et certains canards introduits en Europe ont également pu se reproduire avec les espèces indigènes. Ce type de contamination génétique est très dangereux pour certaines espèces.

On pourrait donner des centaines d'exemples : on pense à l'écureuil gris d'Amérique du Nord (*Sciurus carolinensis*) qui a supplanté l'écureuil roux d'Europe (*Sciurus vulgaris*), également en Italie. Malgré le fait que depuis des années, il a été décidé de l'éradiquer et que le commerce a été interdit (Convention de Berne de 1979 ; décret du 24 décembre 2012), l'écureuil gris d'Amérique du Nord peut être facilement acheté et est présent dans les jardins urbains, même en Italie.^{564, 565} Cet exemple banal montre combien il est difficile de garantir l'éradication, même lorsque les pays, par le biais de réglementations, s'accordent sur un plan d'action. Dans ces cas, les coûts de l'inaction sont beaucoup plus élevés que ceux de la prévention et de l'éradication. Cet aspect, qui est d'une importance vitale pour la protection de la biodiversité, est abordé de manière superficielle et insuffisamment déterminée.

Pour en revenir aux écureuils, n'oublions pas qu'ils sont des jardiniers actifs. Certaines espèces sont capables de reconnaître une graine malade qui ne se conservera pas et sera donc consommée immédiatement. Ils déposent les graines saines dans le sol afin de les stocker pour les périodes hivernales de pénurie alimentaire. Leur réserve pourrait être vidée par une germination prématurée. Certains écureuils ont appris à ronger l'embryon avant de stocker les glands afin qu'ils ne puissent pas germer. Certaines plantes, comme certains chênes, ont développé une contre-mesure contre le rongement des ongles par les rongeurs : elles ont positionné l'embryon de manière à ce qu'il ne puisse pas être endommagé. Cette adaptation évolutive est le résultat de l'éternelle lutte entre les proies et les prédateurs.

De nombreux parasites de l'abeille européenne (*Apis mellifera*) sont des espèces exotiques telles que les acariens (*Varroa destructor*) ou le bourdon asiatique à pattes jaunes (*Vespa velutina*), qui a probablement été introduit par l'importation de bonsaïs. Ce frelon est un prédateur très habile des abeilles, même sur son territoire, mais c'est en Europe que ce papillon est capable de menacer sérieusement l'existence des abeilles d'élevage. Les espèces d'abeilles d'Asie du Sud-Est ont adopté certains comportements précieux pour lutter contre ce prédateur, comme le fait de s'entasser sur l'intrus et de le surchauffer jusqu'à la mort ; ces comportements sont, jusqu'à présent, inconnus des abeilles européennes.

D'autres arthropodes nuisibles introduits en Europe peuvent être mentionnés :

- La chrysomèle des racines du maïs (*Diabrotica virgifera virgifera*) est un insecte (coléoptère) d'origine américaine, appartenant à l'ordre des coléoptères, qui peut causer de graves dommages au maïs si la culture est répétée deux ou plusieurs années de suite sur la même parcelle. En 1992, en Europe, elle a été trouvée en Serbie, près de l'aéroport de Belgrade ; dans la Communauté européenne, la chrysomèle du maïs a été signalée pour la première fois en 1998 dans un champ de maïs de la municipalité de Venise. ⁸⁰⁷ Il s'agit d'une espèce étrangère qui endommage une culture entièrement artificielle.
- Le nématode à kyste jaune (*Globodera rostochiensis*) parasite les plantes solanacées telles que les pommes de terre et les tomates. Il forme des kystes près des racines. Il est originaire d'Amérique du Sud et a été découvert en Allemagne en 1913.
- La teigne orientale du pêcher (*Cydia molesta*) est un papillon originaire de l'Asie orientale, qui s'est facilement répandu en Amérique, en Australie et en Europe occidentale. Les larves mesurent 10 à 15 mm de long et causent des dégâts sur les pousses et les fruits. ⁸¹¹
- Le papillon des agrumes (*Prays citri*) est un papillon dont les dégâts concernent principalement les fleurs (les larves pénètrent dans les fleurs, les rassemblent avec des fils soyeux, rongent jusqu'à l'ovaire et peuvent s'attaquer aux bourgeons et aux petits fruits, sur lesquels apparaissent des érosions, les vidant et les faisant tomber). ⁸¹²
- Le mildiou de la vigne (*Plasmopara viticola*), qui est un micro-organisme (appartenant à la classe des oomycètes) originaire d'Amérique, a été importé accidentellement en France vers 1878, d'où il s'est répandu dans toute l'Europe.
- Le mildiou (*Phytophthora infestans*), qui est un micro-organisme (appartenant à la classe des oomycètes), affecte particulièrement les plantes de la famille des solanacées telles que les pommes de terre et les tomates. Elle a été la principale cause de la grande famine qui a sévi en Irlande entre 1845 et 1849. Dans ce cas, l'espèce exotique a provoqué une catastrophe : elle a détruit toute la récolte de 1846 et causé la mort d'environ un million de personnes et l'émigration à l'étranger d'un autre million (il y avait probablement 8,5 millions d'Irlandais vivant sur l'île à l'époque). ^{813, 814}
- L'aleurode (*Bemisia tabaci*) a été signalé en Europe dès la fin du XIXe siècle, en Grèce, tandis que son apparition en Italie a été documentée en 1939. ⁸²² Il appartient à la famille des insectes de l'ordre des Homoptères Rhynchota, c'est-à-dire ceux qui produisent du miellat, peut affecter 900 espèces végétales différentes et transmettre au moins 10 types différents de virus aux plantes. ⁶⁹⁸
- Le moustique tigre (*Aedes albopictus*) est un insecte appartenant à l'ordre des diptères. Les premiers spécimens reproducteurs en Europe ont été trouvés dans le nord de l'Albanie en août 1979. L'équipe de surveillance albanaise a supposé que le moustique était présent depuis au moins 1975 et que le moyen de transport était un cargo en provenance de Chine qui avait accosté à Durres. En Italie, il est apparu à Gênes, probablement en 1990, dans un entrepôt de pneus usagés importés des Etats-Unis. Le moustique tigre peut transmettre des nématodes comme la dirofilariose et des virus responsables de maladies telles que la fièvre jaune, l'encéphalite de Saint-Louis, la dengue, le chikungunya et le zika. ⁸⁰⁸ La première épidémie européenne de chikungunya a été enregistrée en Italie en 2007. ⁶⁹⁸
- Depuis 1500, au moins 102 espèces d'acariens ont été introduites (ce sont des parasites de la classe des arachnides). Les acariens sont des membres microscopiques à huit pattes (les insectes en ont six) du groupe des araignées et sont, dans la plupart des cas, trop petits pour être vus à l'œil nu. Après les insectes, ils constituent le groupe d'animaux le plus diversifié de la planète : au moins 48.000 espèces ont été identifiées, ce qui ne représente probablement qu'une petite fraction des espèces existantes. Ils sont très adaptables : ils peuvent fonder une famille dans la trachée d'une abeille et se transporter

facilement d'une fleur à l'autre, par exemple sur le bec d'un colibri.⁸⁴⁸ Les acariens comprennent les tiques, qui peuvent transmettre la gale et le typhus.

- Au moins 43 espèces de fourmis exotiques ont été recensées.

En Europe, on estime qu'il existe au moins 12.000 espèces exotiques, dont plus de 10% sont considérées comme envahissantes. En Europe également, on a constaté au fil du temps une augmentation du nombre d'arthropodes considérés comme non indigènes.⁸¹⁰ Entre 2000 et 2008, on a enregistré en moyenne plus de 19 nouvelles espèces exotiques par an, principalement des espèces phytophages. Au moins 700 espèces d'arthropodes exotiques ont été recensées en Italie.

Au Royaume-Uni et en Irlande, le nombre de plantes envahissantes recensées dépasse le nombre d'espèces indigènes. En 1870, une espèce végétale étrangère originaire d'Amérique (*Spartina alterniflora*) a été introduite au Royaume-Uni, où elle a pu se croiser avec une espèce indigène (*Spartina maritima*), donnant lieu à des hybrides stériles. Entre 1970 et 2004, un inventaire britannique a enregistré l'introduction de 234 agents pathogènes des plantes : champignons, bactéries et virus (79% des organismes non indigènes enregistrés étaient des champignons).

En France, depuis 1800, on estime que 227 espèces de champignons ont été introduites, dont 65% sont des phytopathogènes, les champignons mycorrhiziens représentent 30% et les champignons saprophytes 4%.⁶⁹⁸

La propagation d'espèces végétales étrangères peut générer de nombreux problèmes tels qu'une réduction de la biodiversité, mais aussi des coûts directs pour la santé humaine : la plante *Ambrosia artemisiifolia* est arrivée en Europe et en Italie au milieu du siècle dernier en provenance d'Amérique du Nord et son pollen est allergène.⁵⁵⁹ Un gramme de pollen d'ambrosie contient environ 30 à 35 millions de grains de pollen ; une plante bien développée peut produire plus de 45 grammes de pollen en un an.⁵⁶¹ Environ 10 grains de pollen par mètre cube d'air suffisent à provoquer une rhinite allergique chez les personnes sensibles ; 50 grains de pollen de graminées par mètre cube d'air suffisent à provoquer des réactions désagréables.⁵⁶¹ En Europe, *Ambrosia artemisiifolia* entraîne des coûts s'élevant à plusieurs centaines de millions d'euros.⁵⁶¹ En Autriche, où la plante est responsable de 30% des allergies, on a calculé que le pollen d'*Ambrosia* entraîne un coût supplémentaire d'environ 600 euros par an et par personne allergique.⁵⁶⁰ En France et en Italie, le coût généré par les allergies à l'*Ambrosie* a été estimé à 2 millions d'euros par an.⁵⁶¹ Il est devenu si répandu en Europe que son éradication est impossible.

Pour avoir une autre idée de l'ampleur du problème, en Europe, au moins 11.000 espèces végétales (par exemple, des plantes ornementales ou horticoles) ont été introduites, dont environ 10% causent des dommages écologiques et 12% génèrent des coûts supplémentaires.⁵⁵⁸ Parmi les plantes non indigènes introduites en Europe figure la jacinthe d'eau (*Eichhornia crassipes*).⁵⁶² C'est une plante aquatique flottante qui pousse à la surface des rivières, des canaux et des lacs dans les régions tropicales. Dans les zones où elle a été introduite, elle est devenue envahissante en raison de son taux de croissance élevé et de l'absence d'herbivores. Elle a été incluse dans la liste des 100 espèces exotiques les plus nuisibles au monde.⁵⁶³ Les actions non durables visant à contrer la propagation des plantes exotiques incluent l'utilisation de la lutte chimique, comme les herbicides, qui créent un nouveau désastre écologique sans résoudre le problème initial.

LA VITICULTURE ET L'INSECTE VECTEUR (EXOTIQUE) DE LA FLAVESCENCE DORÉE : DES CHOIX ÉCO-DURABLES

Le phytoplasme est un parasite des plantes qui ne peut survivre qu'au sein de la plante hôte et de l'insecte vecteur (les phytoplasmes sont des bactéries sans paroi cellulaire). La flavescence dorée est un phytoplasme (causant la phytoplasme) qui affecte la vigne. La maladie est endémique dans les régions européennes, mais n'était pas un problème jusqu'à l'arrivée de l'insecte vecteur *Scaphoideus titanus*, originaire d'Amérique du Nord, où le grapevine flavescence phytoplasma n'est pas présent (en Amérique, *Scaphoideus titanus* est un vecteur d'autres phytoplasmes). La cicadelle (*Scaphoideus titanus*) est un insecte (appartenant à l'ordre des Rhynchidae Homoptera Auchenorinchi) qui vit exclusivement aux dépens de la vigne. Elle est présente en Europe depuis le début des années 1960, où elle a touché la plupart des zones viticoles. Le plus grand danger n'est pas tant représenté par les piqûres faites pour aspirer la sève, mais par le fait qu'il est un vecteur du phytoplasme de la flavescence dorée. Le vecteur est arrivé en France en 1955, et a été signalé pour la première fois en Italie en 1963, en Ligurie. *Scaphoideus titanus* ne vit qu'aux dépens des espèces du genre *Vitis* spp. : outre la vigne européenne (*Vitis vinifera*), il a également été signalé sur certaines espèces de vigne américaine. La culture de l'utilisation de produits chimiques dans l'agriculture est tellement répandue et acceptée que dans de nombreux cas, elle est imposée. Les viticulteurs sont obligés d'utiliser des pesticides contre l'insecte (*Scaphoideus titanus*) qui est le vecteur de la maladie appelée flavescence dorée sur les vignes. Le contrôle de l'insecte est obligatoire puisque, en cas de non application des dispositions, les viticulteurs non conformes sont dénoncés aux autorités judiciaires (en vertu de l'article 500 du code pénal).⁸¹⁷ Il appartient aux Régions d'établir des sanctions administratives pour ceux qui ne se conforment pas, c'est-à-dire ceux qui n'appliquent pas d'insecticides et de régulateurs de croissance en cas de présence d'insectes. Bien que les vignes ne soient pas pollinisées par les abeilles, elles peuvent néanmoins être visitées pour les substances sucrées contenues dans les raisins. Les traitements insecticides sur les vignes sont depuis longtemps associés à de fortes augmentations de la mortalité des abeilles.³⁵ La viticulture implique un niveau élevé de lutte chimique contre les parasites et est donc très dangereuse pour les insectes, mais pas seulement. Il convient de remarquer qu'un document sur les exigences relatives à l'accréditation des organismes certifiant les produits biologiques inclut la culture du raisin de table et du riz parmi les facteurs de risque élevés dus aux pesticides.⁷⁷ Les cultures biologiques situées à proximité de cultures conventionnelles peuvent être endommagées par la dérive et la disparition d'insectes et d'autres organismes bénéfiques (par exemple, les plantes à fleurs).

En Italie, la législation nationale de 2000 décrète :⁸¹⁷

"La lutte contre la flavescence dorée de la vigne sensu stricto et son vecteur Scaphoideus titanus Ball. est obligatoire sur le territoire de la République italienne afin de combattre sa propagation. Dans la zone déclarée "foyer", zone dans laquelle la présence de la flavescence dorée a été officiellement constatée et où l'éradication de la maladie peut être considérée comme techniquement possible, toute plante présentant des symptômes suspects de flavescence dorée doit être immédiatement arrachée, sans qu'il soit nécessaire de procéder à des analyses de confirmation.

Les exigences de la région du Piémont à cet égard sont indiquées ci-dessous : ⁸¹⁸

"À partir du moment où le scaphandre acquiert le phytoplasme en se nourrissant de vignes infectées, il faut environ un mois de multiplication du micro-organisme dans l'insecte avant qu'il ne puisse transmettre la maladie à des vignes saines. Par conséquent :

- Le premier traitement insecticide doit être effectué environ 30 jours après le début de l'éclosion des œufs. Remarque : Si des insecticides à action lente, tels que des régulateurs de croissance, sont utilisés, le moment du traitement doit être avancé de manière appropriée ;

- Le deuxième traitement contre les adultes doit être effectué 20 jours après le premier ;

- Si des réinfestations d'adultes se produisent pendant l'été, un troisième traitement peut être nécessaire.

Pour que les traitements soient les plus efficaces possibles, il est indispensable de procéder à un mouillage complet de l'ensemble de la végétation afin de cibler les oisillons et nymphes abrités sur la face inférieure des feuilles, notamment en utilisant des produits n'ayant pas d'effet asphyxiant. Pour le choix des produits insecticides et les intervalles d'intervention, il est nécessaire de suivre les indications des services d'assistance technique liés au Service de la protection des végétaux".

La région du Piémont en 2019 a fourni : ⁸¹⁹

"Dans les vignobles où le pourcentage de présence de la maladie est inférieur à 2%, il est obligatoire d'arracher les vignes infectées. Dans les vignobles où les conditions d'une lutte antivectorielle efficace n'existent pas et dans les vignobles présentant plus de 30% de vignes infectées, déterminées ne serait-ce qu'au moyen d'un échantillon identifié selon une méthodologie statistiquement appropriée pour assurer sa représentativité par rapport à l'ensemble du vignoble, le Département des services phytosanitaires et technico-scientifiques peut ordonner l'arrachage de l'ensemble du vignoble."

Les molécules insecticides indiquées dans la réglementation régionale du Piémont pour être utilisées contre les cicadelles sont les suivantes : l'acétamipride (néonicotinoïde), le chlorpyrifos méthyle (fofo-organique), l'étofenprox (éthers phénoxybenzyls), le flupyradifuron (buténolides) et les pyréthroides tels que l'acrinathrine, le tau-fluvalinate, la bêta-cyfluthrine, la cyperméthrine, la deltaméthrine, l'esfenvalerate, la lambda-cyhalothrine et la zeta-cyperméthrine. En outre, pour la production de vin biologique dans le Piémont : ⁸¹⁹

"Les exploitations viticoles en agriculture biologique doivent effectuer au moins trois traitements insecticides, au pyrèthre ou aux sels potassiques d'acides gras, dont au moins deux au pyrèthre, sur les jeunes tous les 7-10 jours, dans la période mai-juin ; le positionnement des traitements doit être établi en tenant compte de la floraison de la vigne et du cycle du scaphoïde. Les deux substances actives n'agissent que par contact et doivent donc être distribuées de manière à affecter également la face inférieure des feuilles, où se trouvent généralement les stades juvéniles. Il n'existe pas de substances actives autorisées en culture biologique contre le scaphandre adulte, les interventions contre les stades juvéniles sont donc essentielles pour réduire la population de l'insecte vecteur.

L'utilisation d'insecticides est donc également obligatoire pour la viticulture biologique. La législation régionale du Piémont prévoit également les sanctions suivantes : *quiconque ne respecte pas les obligations relatives à l'exécution des traitements insecticides obligatoires est puni d'une sanction administrative consistant à verser une somme de 400 à 2.400 euros.*⁸²⁰ Dans le Piémont, les dispositions suivantes sont également appliquées :⁸²¹

" ...l'exécution obligatoire des mesures phytosanitaires prescrites et l'imputation des frais au contrevenant ;
- la suspension de toute forme de contribution économique dans le secteur agricole à tout titre géré par la Région Piémont. "

Cette espèce exotique, qui cause d'énormes dégâts aux vignes, a conduit les autorités sanitaires à la pire des solutions : obliger les viticulteurs à utiliser des armes chimiques dévastatrices. Il vaudrait mieux avoir le courage d'adopter des stratégies différentes, bien qu'impopulaires, que d'apporter des molécules toxiques à la table et d'empoisonner l'environnement. Cette affaire est une manifestation représentative de la négation de l'existence de règles biologiques et chimiques naturelles, qui ne sont pas asservies à des intérêts économiques égoïstes et inconsidérés. La nature a des limites dans lesquelles nous pouvons évoluer avec une sécurité présumée que nous refusons de voir. Les réalisations technologiques qui semblent aujourd'hui indispensables et qui permettent à l'homme de dominer (temporairement) la nature amèneront les générations futures à se demander pourquoi nous avons laissé faire : il n'est pas exclu qu'elles nous méprisent. Nous continuons à ignorer dangereusement les règles du jeu pour survivre.

LES ESPÈCES NON NATIVES D'AMÉRIQUE

En 100 ans, au moins 50.000 espèces de plantes, d'animaux et de microbes ont été introduites aux États-Unis (50% sont des plantes). 25.000 espèces végétales introduites artificiellement aux États-Unis sont numériquement plus nombreuses que les 17.500 espèces végétales considérées comme indigènes sur les mêmes territoires.⁵⁵⁸ Sur les plus de 25.000 plantes non indigènes introduites, au moins 900 se sont adaptées à l'environnement naturel de la Floride, de sorte qu'elles sont hors de contrôle.⁶⁹⁸ Au moins 500 plantes exotiques sont devenues des mauvaises herbes et se répandent dans des zones présentant des caractéristiques naturelles, à raison de centaines de milliers d'hectares par an (au moins 700.000 ha/an). Dans les pâturages, 45% des mauvaises herbes sont exotiques. Une plante importée d'Europe aux États-Unis, l'épilobe à feuilles étroites (*Lythrum salicaria*), se déplace à un rythme de plus de 115.000 ha/an. Dans les zones naturelles, cette espèce envahissante a entraîné une réduction de la présence d'au moins 44 espèces végétales indigènes. 138 espèces d'arbres introduites artificiellement se répandent également dans les milieux naturels, menaçant les espèces sauvages dont dépendent de nombreux animaux, car une réaction en chaîne se produit. Une plante toxique pour le bétail et les ongulés sauvages (*Euphorbia esula*), importée d'Europe au début des années 1800, est devenue une espèce envahissante dans les zones agricoles et naturelles. Aux États-Unis, au moins 1.579 espèces de plantes sont répertoriées comme étant envahissantes dans les zones naturelles ; certaines plantes exotiques sont favorisées par les ouragans et les inondations.⁸²³

De nombreux animaux non indigènes se sont bien adaptés, comme 18 espèces de rongeurs, 6 de primates, 99 d'oiseaux, 69 de reptiles, 533 de poissons. On peut citer le rat (*Rattus norvegicus*) et d'autres espèces habituellement tolérées comme le sanglier, le chat, le moineau domestique (*Passer domesticus*), le pigeon, plus connu sous le nom de pigeon sauvage de l'Ouest (*Columba*

livia) et l'étourneau sansonnet (*Sturnus vulgaris*). Le moineau domestique a probablement été introduit aux Etats-Unis en 1853 pour combattre un insecte. Aujourd'hui, on connaît au moins 29 maladies que les moineaux peuvent transmettre à l'homme ou à la faune sauvage, et en se nourrissant de céréales, ils causent des pertes aux agriculteurs. Les pigeons sont les vecteurs d'au moins 50 maladies, de sorte que lorsque de nouvelles espèces sont introduites, leurs maladies sont également transportées.

Plus de 2.000 espèces d'arthropodes ont également été introduites aux États-Unis. Par exemple, on estime que la Floride compte au moins 11.500 espèces d'insectes indigènes et 949 espèces introduites, dont 42 ont été importées pour la lutte biologique. En Californie, 600 espèces d'insectes introduites par l'homme sont responsables de 67% des pertes de récoltes.⁶⁹⁸

Les États-Unis, comme la plupart des zones agricoles de la planète, sont le résultat d'un processus irréversible d'anthropisation, à tel point que des espèces exotiques endommagent le blé, le maïs, le riz ou les fermes comme les élevages de poulets, qui sont également des espèces exotiques et souvent artificielles, c'est-à-dire créées par le génie humain ; aux États-Unis, les espèces exotiques fournissent probablement plus de 98% de la nourriture que les Américains consomment. En même temps, la grande majorité des insectes qui endommagent les cultures sont des espèces exotiques : au moins 40% des espèces responsables de la réduction de 13% des rendements sont des espèces introduites par les activités humaines. Dans les contextes agricoles qui constituent un système artificiel, la distinction entre les avantages et les inconvénients générés par les espèces introduites artificiellement n'est possible que si le point de vue est exclusivement anthropocentrique. C'est la perspective utilisée pour estimer les pertes de récolte dans les environnements agricoles qui accueillent des monocultures intensives de plantes sélectionnées par l'espèce humaine. Dans de tels environnements artificiels, il est difficile, voire impossible, d'adopter une vision écocentrique, car le système d'agriculture chimique et intensive est lui-même étranger à la biosphère.

L'INVASION D'ESPÈCES NON INDIGÈNES EN AUSTRALIE

L'impact de l'introduction d'espèces non indigènes sur l'équilibre des écosystèmes est dévastateur et entraîne également une réduction de la biodiversité. Une histoire dramatique est celle de l'Australie, où lapins, renards, chats, chameaux, chèvres et chiens ont causé des dommages irréversibles aux marsupiaux.

On estime que le nombre de plantes exotiques introduites est au moins égal au nombre d'espèces indigènes, 25.000 chacune. Les espèces vertébrées envahissantes qui ont causé d'énormes dégâts sont le lapin européen, le sanglier et le chat. En 1859, un colon britannique a lâché 24 lapins en Australie. Dix ans plus tard, les lapins étaient si nombreux sur le continent que même l'abattage de deux millions de lapins n'a pas permis de réduire la population. Lorsqu'une maladie (le virus de la myxomatose) a été introduite en Australie en 1950 pour la lutte biologique contre les lapins, il y avait au moins un milliard de lapins.⁸⁴⁸ L'introduction de cette maladie, puis d'autres, a réduit le nombre de lapins mais a sélectionné des populations résistantes. Les lapins ont probablement contribué à la disparition d'au moins un huitième de tous les mammifères australiens et de nombreuses espèces végétales. Aujourd'hui encore, l'éradication des lapins d'Australie est une mission impossible pour un certain nombre de raisons telles que leur fécondité - une femelle donne naissance à 30 petits par an, qui deviennent sexuellement matures après six mois.

Les invertébrés introduits en Australie comprennent les moustiques (genres *Aedes* et *Culex*) qui sont les vecteurs d'un certain nombre de maladies dangereuses (par exemple l'encéphalite), les tiques qui véhiculent des maladies pour le bétail, les abeilles domestiques, certaines guêpes et

les espèces de fourmis. Les abeilles (*Apis mellifera*) ont été introduites en Australie vers 1822 et, en 1998, on recensait au moins 670.000 ruches.

Parmi les insectes nuisibles introduits en Australie figure un hyménoptère (*Sirex noctilio*) qui, entre 1987 et 1989, a provoqué la mort de plus de cinq millions d'arbres (*Pinus radiata*), eux-mêmes introduits en 1870 (ils sont originaires d'Amérique du Nord).⁶⁹⁸ Une espèce étrangère a conduit à l'extermination d'une autre espèce introduite volontairement.

En 2016, le premier signalement de la présence de l'acarien *Varroa* sur des colonies d'*Apis mellifera* a été effectué, ce qui constitue, pour ce continent, une autre espèce exotique.

LA PROPAGATION DE CERTAINES MALADIES TRANSMISES PAR LES INSECTES

Le changement climatique et la mondialisation favorisent la propagation d'insectes qui sont des vecteurs de maladies dangereuses pour l'homme.⁷⁹¹ Les maladies transmises à l'homme par les moustiques causent des centaines de milliers de décès chaque année dans le monde. Il existe plus de 3.000 espèces connues de moustiques, mais trois d'entre elles sont les principales responsables de la propagation des maladies à l'homme. Le moustique *anophèle* est la seule espèce connue responsable de la transmission de la malaria. Les moustiques *Culex* peuvent transmettre l'encéphalite, la filariose et le virus du Nil. Le moustique tigre (*Aedes albopictus*) est originaire d'Asie du Sud-Est et s'est répandu dans de nombreuses régions du monde grâce au transport commercial : au milieu du XXe siècle, il s'est répandu en Afrique et au Moyen-Orient, puis en Amérique du Sud, aux États-Unis, en Océanie et, enfin, en Europe. Les premiers spécimens reproduits en Europe ont été trouvés dans le nord de l'Albanie en août 1979 et en Italie il a fait son apparition en 1990 à Gênes, où il est arrivé par bateau des États-Unis.^{787, 791} De Gênes, il s'est répandu pratiquement dans toute la péninsule et est maintenant présent dans de nombreux autres pays européens. Ce moustique est diurne et ses œufs résistent à la sécheresse pendant plus de 6 mois, mais pour éclore et commencer le cycle larvaire, ils doivent nécessairement être immergés dans l'eau. Le moustique tigre a un rayon d'action limité (moins de 200 mètres), les sites de ponte sont donc proches des lieux d'observation. Comme pour les autres espèces de moustiques, seules les femelles *Aedes albopictus* ont besoin d'un repas de sang pour produire des œufs. Elles complètent leurs besoins énergétiques avec du nectar et d'autres jus de légumes sucrés, tout comme les mâles. La femelle du moustique tigre (*Aedes albopictus*), qui est responsable des piqûres humaines, peut avoir plusieurs prises de sang, à 3-5 jours d'intervalle, et dans des conditions optimales vit environ 4 semaines.⁷⁸⁸ Environ 60 heures après la prise de sang, les femelles pondent entre 40 et 80 œufs, qu'elles placent individuellement juste au-dessus du niveau de l'eau. Une humidité de 60-70% et des températures de 25°C sont suffisantes pour qu'environ un quart des œufs pondus survivent pendant 4 mois. Outre l'homme, *Aedes albopictus* pique également d'autres mammifères et oiseaux. Ce moustique peut transmettre diverses maladies telles que des nématodes comme la dirofilariose et des virus responsables de maladies comme la fièvre jaune, l'encéphalite de Saint-Louis, la dengue, le chikungunya et le zika. Le moustique tigre est également important dans le secteur vétérinaire car, par exemple, il peut être un vecteur de vers parasites du genre *Dirofilaria*, agents de la dirofilariose cardiovasculaire chez les chiens et les chats.

Le moustique tigre a été le vecteur du virus du chikungunya qui a provoqué la première épidémie enregistrée de cette maladie en Europe. L'épidémie a été enregistrée en Italie, dans la province de Ravenne, au cours de l'été 2007 : plus de 200 personnes ont été infectées. En 2017, une épidémie de chikungunya a touché plus d'une centaine de personnes dans le Latium. En 2010, ce moustique a été responsable de la propagation du virus de la dengue en France, en Croatie et en Allemagne.⁷⁸⁶

Le chikungunya est une maladie virale caractérisée par de la fièvre et de fortes douleurs. Après une période d'incubation de deux à douze jours, la fièvre et les douleurs articulaires surviennent brutalement, limitant les mouvements des patients, qui ont tendance à rester absolument immobiles et à adopter des positions antalgiques (d'où le nom de *chikungunya*, qui signifie en *swahili* "ce qui se courbe" ou "se tord"). Dans la plupart des cas, les patients se rétablissent complètement, mais dans certains cas, les douleurs articulaires peuvent persister pendant des mois, voire des années.

D'origine virale, la dengue est causée par quatre virus très similaires et se transmet à l'homme par la piqûre de moustiques qui ont à leur tour piqué une personne infectée. Il n'y a donc pas de contagion directe entre humains, bien que l'homme soit le principal hôte du virus. Le virus circule dans le sang de la personne infectée pendant 2 à 7 jours, période pendant laquelle le moustique peut le capter et le transmettre.⁷⁸⁹ Normalement, la maladie entraîne de la fièvre dans les 5 à 6 jours suivant la piqûre du moustique, avec des températures pouvant être très élevées. La fièvre s'accompagne de maux de tête aigus, de douleurs autour et derrière les yeux, de fortes douleurs musculaires et articulaires, de nausées et de vomissements, et d'une irritation de la peau.

La transmission du virus Zika à l'homme se fait généralement par la piqûre d'un moustique vecteur. Si une personne piquée par un moustique porteur est ensuite piquée par un moustique non infecté, cela peut déclencher une chaîne qui peut conduire à une épidémie endémique. La contagion inter-humaine est possible et peut se faire par les fluides biologiques (voie sexuelle, transfusions, passage materno-fœtal). On estime que 80% des cas sont asymptomatiques. Les symptômes, lorsqu'ils sont présents, sont similaires à ceux d'un syndrome grippal et durent environ 4 à 7 jours, parfois accompagnés d'autres symptômes (éruption cutanée, arthralgie, myalgie, céphalées et conjonctivite) qui apparaissent 3 à 13 jours après la piqûre du moustique vecteur. Une hospitalisation est rarement nécessaire.⁷⁹⁰

Ainsi, la mondialisation et le changement climatique favorisent la propagation d'espèces exotiques et de parasites porteurs de maladies. Comme les insectes deviennent plus mobiles en raison des activités humaines et des conditions climatiques favorables, les problèmes sanitaires vont augmenter ; la propagation des maladies exotiques en Europe est favorisée et constitue un problème mondial.

QUELQUES FACTEURS FAVORISANT LA PROPAGATION ARTIFICIELLE DES ESPÈCES

Partout dans le monde, la création de jardins botaniques et de parcs urbains a favorisé la propagation d'espèces végétales non indigènes et de leurs hôtes, tels que les arthropodes parasites. La création de parcs et de jardins avec des plantes importées a favorisé l'expansion de ce problème. Pour donner un exemple, la plupart des papillons non indigènes d'Europe (Lepidoptera) ont été introduits par l'introduction de plantes exotiques dans les parcs et jardins, et certains d'entre eux ont colonisé les zones cultivées, car ils sont phytophages.

D'autres facteurs importants dans la propagation artificielle de certaines espèces ont été la pêche (par exemple, la truite et le saumon) et la chasse sportive (par exemple, les faisans, les sangliers, les cerfs, les canards), le commerce des animaux de compagnie et le commerce des plantes ornementales. Par exemple, les sangliers ont disparu puis ont été introduits pour la chasse : le sanglier a disparu de Grande-Bretagne il y a 700 ans.

De nombreux facteurs peuvent transformer une espèce indigène en une espèce envahissante et nuisible. Par exemple, dans les milieux naturels, l'aide artificielle fournie par les apiculteurs fait de ces insectes des concurrents redoutables pour les espèces sauvages qui se nourrissent de pollen et de nectar.

L'utilisation d'herbicides a sélectionné artificiellement l'évolution des herbes qui sont résistantes à ces poisons. La même chose s'est produite avec les insectes en raison de l'utilisation d'insecticides. Ainsi, une espèce peut être indigène et devenir envahissante parce qu'elle est résistante aux insecticides, aux herbicides ou pour d'autres raisons.

Certaines espèces ne peuvent pas se déplacer indépendamment et naturellement entre différents écosystèmes, mais peuvent être déplacées artificiellement. Par exemple, des organismes vivant dans un lac peuvent être déplacés artificiellement vers un autre, ce qui serait autrement improbable. Ainsi, même les espèces indigènes peuvent devenir, dans des conditions artificielles, un problème à la fois écologique et pour les intérêts économiques de l'humanité (par exemple, en raison de la génération de coûts supplémentaires pour la production alimentaire).

Un autre aspect qui peut avoir des effets majeurs est la possibilité de distribution d'espèces de semences non indigènes dans l'environnement. La propagation peut être générée par l'utilisation d'aliments provenant d'autres États ou continents. Une enquête sur les chevaux utilisés à des fins récréatives dans un parc californien a montré que les excréments distribuaient 32 espèces de plantes, dont 4 étaient non indigènes.⁸⁹⁸ Ainsi, l'importation d'aliments pour animaux peut favoriser la distribution d'espèces dangereuses pour l'agriculture ou nuisibles aux espèces sauvages.

Le transport d'animaux qui se nourrissent de graines est un autre mécanisme de propagation indirecte des plantes. Les oiseaux tels que les pigeons ou les geais sont les avions sur lesquels se déplacent naturellement de nombreuses plantes migratrices. Grâce aux oiseaux, ils peuvent se déplacer beaucoup plus loin et plus vite. La propagation de certaines espèces d'oiseaux favorise la colonisation par de nombreuses plantes qui se sont adaptées pour exploiter ce type de transport.

Les stratégies visant à ralentir la propagation des espèces exotiques comprennent la création de zones protégées et l'identification des zones où se trouvent des espèces potentiellement dangereuses si elles devaient être accidentellement exportées. Dans les zones protégées, l'entrée de marchandises et d'organismes vivants doit être surveillée et contrôlée. Dans les zones où des espèces dangereuses ont été identifiées, des mesures très strictes doivent être mises en œuvre concernant les exportations et le commerce de marchandises.⁸¹⁵ Les contrôles sont généralement basés sur des inspections visuelles (vétérinaires, botanistes, entomologistes) et des analyses de laboratoire. Pour pouvoir être commercialisées en Europe, les plantes doivent avoir une certification appropriée, identifiée par le terme "passeport phytosanitaire".

Il existe des listes officielles d'organismes particulièrement dangereux. Par exemple, 20 organismes nuisibles, inclus dans la liste publiée par la Commission européenne en octobre de l'année 2019, sont des organismes de quarantaine, classés en tête des priorités pour les États membres de l'UE, en fonction de la gravité des problèmes économiques, sociaux et environnementaux qu'ils peuvent causer. Parmi ces 20 organismes figure *Xylella fastidiosa*, une bactérie (Gram négatif) originaire du continent américain. Depuis la fin des années 2000, *Xylella fastidiosa* (spp. pauca) a également été signalée en Italie (premier signalement d'une présence en Europe), avec des infestations débutant dans les oliveraies.

Un organisme nocif de quarantaine est un organisme nuisible qui remplit toutes les conditions suivantes pour un territoire défini :⁸¹⁶

- (a) son identité a été établie ;
- (b) il n'est pas présent sur le territoire ou, s'il est présent, sa présence sur le territoire n'est pas généralisée ;
- (c) il est capable de pénétrer, de s'établir et de se propager sur le territoire ou, s'il est déjà présent sur le territoire mais peu répandu, il est capable de pénétrer, de s'établir et de se propager dans les parties du territoire où il est absent ;

(d) son entrée, son établissement et sa propagation ont un impact économique, environnemental ou social inacceptable sur le territoire concerné ou, s'il est présent mais peu répandu, sur les parties du territoire où il est absent ;

(e) il existe des mesures réalisables et efficaces pour empêcher l'entrée, l'établissement ou la propagation de cet organisme nuisible sur ce territoire et pour en atténuer les risques et l'impact.

Les plantes commercialisées doivent avoir été conservées dans des conditions de quarantaine et être exemptes d'organismes nuisibles. Malheureusement, les mesures actuelles de prévention et de surveillance ne permettent pas de limiter le déplacement de milliers d'espèces dangereuses, car elles sont étrangères à l'écosystème visé. En conclusion, l'homme est probablement le facilitateur le plus efficace des espèces envahissantes dans l'histoire de la Terre.

INTRODUCTION VOLONTAIRE D'ESPÈCES EXOTIQUES À DES FINS DE LUTTE BIOLOGIQUE

L'introduction délibérée d'espèces exotiques est également effectuée pour mettre en œuvre ce que l'on appelle la lutte biologique, qui consiste à essayer de limiter la croissance des ravageurs des cultures en utilisant leurs ennemis naturels. Les exemples sont innombrables. De nombreuses espèces d'insectes carnivores (insectivores) ont été introduites artificiellement dans l'intention d'aider les agriculteurs. En Europe, au moins 180 espèces d'insectes (hyménoptères parasitoïdes) ont été introduites pour traiter certaines maladies des plantes.⁶⁹⁸

La coccinelle arlequin (*Harmonia axyridis*) est un coléoptère asiatique qui se nourrit de pucerons, de cochenilles, de neuroptères, de syrphes et de nombreux autres insectes phytophages et a donc également été introduit en Europe. Aux États-Unis, la contribution de la coccinelle à la lutte contre un puceron asiatique du soja a été très importante, car les prédateurs indigènes du puceron n'auraient pas été en mesure de le combattre seuls.⁸⁰⁹ La coccinelle arlequin est particulièrement dangereuse pour les vignes. En été, et surtout au moment des vendanges, elle a tendance à se réfugier à l'intérieur des grappes de raisin, grosses et compactes, et à libérer des substances malodorantes et nauséabondes qui, si elles sont présentes dans le moût, altèrent fortement le goût et l'odeur du vin. Son danger pour l'écosystème réside dans le fait que ce type de coccinelle est capable d'éradiquer les espèces aphidophages indigènes et de les remplacer.

L'introduction d'un papillon (*Cactoblastis cactorum*) originaire d'Argentine a été réalisée parce qu'il est un parasite de différentes espèces de cactus du genre *Opuntia* (le célèbre figuier de Barbarie et d'autres types de cactus appartiennent à ce groupe).⁵⁵⁸ Ce papillon (un pyralide) doit sa notoriété au fait qu'il a été utilisé avec succès comme agent de contrôle biologique en Australie dans les années 1920 pour lutter contre certaines espèces d'*Opuntia* (*O. stricta*) qui s'étaient répandues au-delà de toute attente, envahissant plusieurs millions d'hectares de prairies. Après son succès en Australie, il s'est répandu dans d'autres parties du monde, notamment à Madagascar en 1925, en Afrique du Sud en 1933, dans les îles Hawaï en 1950 et dans les Caraïbes en 1957. L'insecte a également été signalé en Floride et au Mexique, où il est considéré comme une menace potentielle pour la biodiversité des cactus locaux.⁵⁶⁷

Un autre exemple est l'introduction d'un crapaud (*Rhinella marina*) dans la culture de la canne à sucre en Australie et au Costa Rica pour limiter le développement de certains parasites de cette culture. L'introduction a également été répétée dans d'autres endroits de la planète, comme les États-Unis d'Amérique et le Japon. Cet amphibien a été inclus dans la liste des cent espèces envahissantes les plus nuisibles au monde.^{558, 568}

Le poisson-moustique (*Gambusia affinis*) est un petit poisson d'eau douce originaire des bassins du Golfe du Mexique (Mississippi) ; il vit dans les eaux douces et saumâtres des marais. Au cours du XXe siècle, les spécimens ont été introduits dans de nombreuses zones

marécageuses du monde, notamment en Italie et dans tout le sud de l'Europe, pour lutter contre les moustiques. Cette espèce figure également dans la liste des cent espèces invasives les plus nuisibles.⁵⁷⁸

Un exemple positif d'introduction d'une espèce d'insecte pour le contrôle biologique d'une plante est enregistré au Royaume-Uni. Il s'agit du psylle japonais (*Aphalara itadori*) introduit pour limiter la propagation d'une plante japonaise envahissante (*Fallopia japonica*).⁵⁵⁸ Dans ce cas, le succès de la transplantation dans de nouveaux écosystèmes a été facilité par la planification et la réalisation d'une étude préliminaire de plusieurs années au cours de laquelle, par exemple, il a été établi que l'insecte ne pouvait pas se reproduire sur des espèces indigènes similaires.

En conclusion, la dissémination délibérée d'espèces non indigènes a favorisé des catastrophes écologiques. En effet, certaines espèces distribuées sur la planète à des fins de contrôle biologique sont classées parmi les cent espèces invasives les plus dangereuses au monde.

QUANTIFIER ET MONÉTISER LA DOMINATION DE L'HOMME SUR LA NATURE

Il est difficile de donner une valeur économique à une plante ou à un oiseau qui disparaît à cause, par exemple, de l'introduction de rongeurs ou de la chasse : la chasse au bison en Amérique du Nord avait fait passer cet animal de quelques millions à quelques milliers en seulement 30 ans (1830-1860).⁷⁰³ Des recherches documentant les causes de 680 extinctions d'espèces animales ont identifié l'introduction d'espèces exotiques comme l'une des principales raisons de leur disparition dans 91 d'entre elles.⁵⁵⁸ Sur certaines îles, l'introduction des chats a entraîné la disparition de 14% des oiseaux, mammifères et reptiles.⁵⁵⁸

Il n'est pas facile de surveiller la présence ou l'absence d'espèces indigènes et introduites afin de quantifier le désastre écologique, les effectifs et l'étendue du territoire occupé. Mesurer les avantages ou les inconvénients générés par les espèces introduites dans certains contextes totalement artificiels, tels que les contextes urbains ou agricoles, n'est pas facile et très souvent inutile. Les terres en jachère dans les zones agricoles peuvent occuper moins de 10% ou 5% de la superficie totale, qui peut s'étendre à des centaines de milliers d'hectares. Par conséquent, l'identification et la classification des quelques espèces qui ont réussi à survivre au labourage, aux herbicides, aux incendies, à la modification du cours des rivières et à la construction, et qui se sont adaptées localement, ont une valeur écologique relative. Ces écosystèmes sont complètement artificiels et dominés par les actions humaines. Le cas des espaces naturels est différent, où les dommages causés par les espèces étrangères aux espèces indigènes sont beaucoup plus évidents et graves.

Il est très difficile d'estimer les dommages économiques générés par l'introduction d'espèces exotiques. Au niveau mondial, certaines estimations chiffrent le coût de l'invasion par plus de 120.000 espèces exotiques à plusieurs centaines de milliards d'euros par an. Les coûts, dans ces estimations, comprennent principalement deux éléments : les dommages, tels que les dommages aux cultures, et les coûts de la lutte contre la propagation des espèces non indigènes. Plusieurs stratégies peuvent être utilisées pour estimer la valeur économique des dommages générés par les espèces non indigènes, telles que :

- Une estimation des coûts générés pour le piégeage (par exemple des souris, des lapins ou des sangliers) et/ou la stérilisation (par exemple des chats).
- La valeur des dommages générés aux cultures. Si un ravageur génère une perte de 4% ou de 30% de la récolte, il est assez facile d'avoir une mesure quantitative du préjudice économique pour l'agriculteur.

- Les dégâts générés par les animaux non indigènes dans les exploitations agricoles. Par exemple, on estime le nombre d'œufs et de poussins capturés par les rongeurs (ou d'oiseaux mangés par la mangouste).
- Les dégâts générés par les animaux exotiques aux espèces sauvages. Par exemple, on estime que les chats domestiques, abandonnés par la suite et sauvages, dont le nombre pourrait dépasser les 60 millions aux États-Unis, peuvent tuer huit oiseaux sauvages chacun par an (ce qui représente 480 millions d'oiseaux exterminés chaque année aux États-Unis par les chats sauvages).^{698, 848}
- Le coût de la lutte contre le parasite ou la mauvaise herbe dans la culture. Dans ce cas, il faut ajouter les coûts supplémentaires liés à la distribution d'insecticides ou d'herbicides. Dans certains cas, l'éradication des plantes invasives non indigènes est effectuée mécaniquement. Là encore, l'estimation des coûts directs pour l'agriculteur est simple, mais les coûts indirects tels que ceux générés par la contamination de la biosphère par les pesticides et les dommages à la santé humaine ne sont pas estimés.
- Les dommages générés aux structures telles que les maisons ou les monuments (par exemple, les termites et les pigeons).
- Coûts de santé supplémentaires (par exemple, en raison de piqûres d'insectes ou de morsures de serpent). Les vagues de peste bubonique qui ont ravagé l'Asie et l'Europe étaient véhiculées par la puce du rat orientale (*Xenopsylla cheopis*).⁸⁴⁸ Il n'est pas facile d'estimer exactement le coût pour la collectivité de maladies telles que celles véhiculées par les rats introduits au Royaume-Uni (salmonellose, leptospirose, toxoplasmose, yersiniose ou bacille de la peste).
- Les coûts générés par les contrôles effectués lors du commerce international, tels que ceux des douanes ou les coûts de soutien à la quarantaine, au retour à l'expéditeur ou à la destruction.

Les estimations des dommages générés par le contrôle des espèces introduites artificiellement sont très difficiles et sous-estiment souvent le problème. Par exemple, dans le cas d'espèces végétales introduites artificiellement, les estimations économiques se contentent très souvent d'additionner les coûts des herbicides avec ceux générés par les mauvaises récoltes. L'estimation des dommages générés par l'introduction d'espèces exotiques dans un écosystème donné est très difficile et souffre d'une limite majeure, celle de la vision anthropocentrique. Les estimations portent presque exclusivement sur les coûts directs encourus à court terme, tels que ceux auxquels sont confrontés les agriculteurs. Nous devrions essayer de créer une nouvelle culture environnementale et encourager une vision du côté des écosystèmes.

Afin de quantifier l'intensité de la présence d'espèces introduites artificiellement dans une zone, il pourrait être utile d'estimer la fraction de la biomasse occupée par les espèces exotiques par rapport aux espèces indigènes. Cette mesure donne une vision plus réaliste de la gravité du problème. Par exemple, en Grande-Bretagne, les espèces exotiques représentent près de la moitié de la biomasse des mammifères et des oiseaux présents. Cependant, comme nous l'avons déjà mentionné, au Royaume-Uni et en Irlande, le nombre de plantes envahissantes enregistrées dépasse le nombre d'espèces indigènes.⁶⁹⁸ Le nombre d'espèces exotiques par rapport aux espèces indigènes n'est donc pas suffisant pour donner une mesure réaliste de la dégradation d'un écosystème.

Une partie de l'utilisation des pesticides et autres poisons (par exemple, les rodenticides) est destinée à ralentir la propagation des espèces non indigènes envahissantes. Il n'est pas facile d'essayer d'estimer les dommages générés par l'utilisation de la lutte antiparasitaire chimique, comme les insecticides et les herbicides. Il est difficile et impopulaire d'attribuer une valeur économique aux dommages sanitaires causés par les pesticides aux agriculteurs et à la communauté. Il est encore plus complexe d'estimer la valeur négative de la pollution des sols et des eaux causée, par exemple, par la contamination par les herbicides.

Il est inconcevable que nous puissions ralentir l'introduction d'espèces non indigènes sur la planète, et le destin le plus réaliste qui nous attend est donc celui de l'uniformité écologique. L'homogénéisation engendre la simplification et l'extinction, favorisant l'arrivée de l'Erémocène, l'ère où il ne nous restera que quelques espèces. L'écosystème agricole artificiel, avec les quelques dizaines d'espèces utiles à l'homme, devient dominant, voire unique. La perspective actuelle est celle de la simplification des écosystèmes et de l'extinction de la majeure partie de la biodiversité.

La dégradation de la diversité naturelle entraînera l'effondrement de la capacité des écosystèmes à fournir des services essentiels à la survie de l'espèce humaine, tels que la nourriture, l'air, le sol et l'eau qui ne sont pas contaminés. Nous ne savons pas quel niveau de dégradation induite par l'homme les écosystèmes peuvent supporter et amortir avant d'entrer dans une zone d'insécurité et d'instabilité. Nous pourrions bientôt découvrir que nous avons depuis longtemps dépassé la zone de sécurité pour l'espèce humaine, alors que nous nous laissons distraire par des estimations inadéquates et irréalistes. Une action beaucoup plus efficace est nécessaire car il ne s'agit plus de réduire les coûts économiques supplémentaires pour les agriculteurs, mais d'éviter un effondrement environnemental irréversible et terrifiant.

En Europe, le coût de l'introduction d'espèces exotiques est estimé à au moins 12,5 milliards d'euros par an.⁵⁵⁸ Il s'agit certainement d'une estimation optimiste, mais c'est un point de départ utile pour élaborer des politiques de prévention et de gestion.

LE VILLAGE AU DESTIN BIOLOGIQUE PROGRAMMÉ

AUTRES CATASTROPHES FUTURES PROBABLES : LE GÉNIE GÉNÉTIQUE

La conception et la création d'organismes dotés de caractéristiques qui n'existent pas dans la nature et qui sont le fruit de l'ingéniosité humaine sont devenues une réalité. Il est possible de fabriquer en laboratoire des micro-organismes dotés de nouvelles caractéristiques, conçus pour répondre aux besoins de l'homme, qui sont plus ou moins critiquables du point de vue de l'éthique et de la sécurité. Certaines créatures animales ont été conçues pour étonner, elles sont les caprices des scientifiques comme les animaux luminescents (ils ont des caractéristiques génétiques copiées sur des insectes ou des organismes marins bioluminescents comme les méduses). Il est également possible de générer des organismes dotés de nouvelles fonctions, inconnues dans la nature. Le principe de précaution devrait être adopté très fermement dans ce domaine, notamment dans le cas de la manipulation de virus, de bactéries et d'autres organismes difficiles à contenir dans un laboratoire ou une entreprise. Combien de temps encore pouvons-nous nous désintéresser du traitement des systèmes biologiques à la manière de la production industrielle dans un système économique qui n'accepte aucune limite ? Il s'agit de nouvelles technologies perturbatrices qui nous permettent de pénétrer dans la partie la plus intime du processus qui génère la variabilité nécessaire pour que l'évolution fasse son travail. L'évolution fonctionne grâce à l'existence d'immenses bibliothèques de caractéristiques génétiques que chaque espèce possède. Les outils de modification de ces bibliothèques (ADN) permettent d'élaborer un processus très dangereux : la sélection artificielle. La biotechnologie offre des outils potentiellement très intéressants, comme la guérison et l'éradication des maladies génétiques. En même temps, elles ouvrent des horizons angoissants comme celui de l'eugénisme, c'est-à-dire la sélection artificielle des êtres humains. Les tentatives de cataloguer les hiérarchies de classe et de race et, par conséquent, d'essayer d'exterminer les inférieurs sont une horreur maintes fois perpétuée par l'humanité.¹¹⁹² L'idée de la race aryenne parfaite a conduit à l'extermination de millions de Juifs, mais il ne faut pas oublier que même aux États-Unis, jusque dans les années 1970, certains États ont procédé à la stérilisation obligatoire des hommes considérés comme inaptes (par exemple, les homosexuels, les patients psychiatriques, les criminels, les Noirs). Entre 1907 et 1963, au moins 64.000 personnes ont été stérilisées aux États-Unis conformément à la législation eugénique. En Caroline du Nord, de 1929 à 1974, un nombre disproportionné de personnes ciblées par la stérilisation forcée étaient des Noirs et des femmes : sur les 7.600 femmes qui ont été stérilisées par l'État entre 1933 et 1973, environ 5.000 étaient afro-américaines.^{1049, 1050} Ces horreurs ne doivent pas être oubliées.

La modification artificielle des gènes des êtres vivants peut être utilisée à des fins militaires, au profit d'entreprises commerciales et pour porter atteinte à la souveraineté alimentaire des concurrents. Les inconnues sont nombreuses et nous sommes présomptueux si nous pensons pouvoir prédire tous les effets négatifs possibles des nouvelles technologies, même si elles ne sont utilisées qu'à des fins potentiellement bénéfiques. L'innovation dans le domaine de l'ingénierie de l'ADN met une fois de plus en évidence le fossé entre la technologie et la réalité, la séparation entre l'économie et l'écologie, et la sous-estimation des dangers de l'inégalité.

LA BIOTECHNOLOGIE OUVRE DE NOUVELLES FRONTIÈRES

Les technologies ouvertes par l'innovation dans le domaine de la génétique sont fascinantes car elles permettent d'entrer dans les mécanismes de contrôle de la sélection naturelle. Il est possible de contrôler et de modifier la variabilité associée aux caractères héréditaires et même aux caractères non héréditaires, tels que ceux établis par des cellules non reproductrices. Dans des contextes artificiels, complètement détachés, séparés et non affectés (temporairement) par les règles de la sélection naturelle, il est possible de promouvoir le succès reproductif différentiel de traits conçus par des ingénieurs biomoléculaires. La sélection artificielle des caractéristiques phénotypiques choisies dans les laboratoires de génétique est grandement accélérée. L'évolution d'une population d'organismes au fil du temps peut être orchestrée et dirigée, générant une innovation majeure : l'évolution artificielle de populations, d'espèces et d'écosystèmes entiers. La capacité à modifier l'environnement est amplifiée de manière énorme et, surtout, irréversible. Les outils et les techniques qui peuvent être utilisés pour générer cette grande révolution sont nombreux, et certains ont le grand avantage d'être très bon marché. Certains d'entre eux sont mentionnés ci-dessous.

CRISPR/Cas9 (*clustered regularly interspaced short palindromic repeats*) est l'acronyme d'une des technologies les plus récentes et les plus prometteuses. Il s'agit d'un système de défense adopté par les bactéries contre les virus. Les bactéries stockent des morceaux d'ADN viral dans leur ADN chaque fois qu'elles sont infectées. Elles les stockent en les intercalant dans des séquences génétiques répétées (répétitions identiques d'environ 29 lettres séparées par des séquences uniques de 32 lettres).¹⁰⁵¹ Des fragments d'ADN viral, insérés dans l'ADN bactérien, sont utilisés pour construire des ARN, petits brins d'acides nucléiques à une seule hélice. Les ARN de copie de l'ADN viral sont utilisés par la bactérie pour rechercher des séquences similaires, c'est-à-dire du matériel génétique viral. Une fois l'envahisseur, agent d'infections potentiellement mortelles, trouvé, l'ARN recrute un système enzymatique (des protéines telles que celle appelée *Cas9*) qui coupe le matériel génétique viral, le rendant ainsi inoffensif. Le matériel génétique portant des séquences homologues à celles du virus, lorsqu'il est attaché à un système protéique spécial, agit comme une sentinelle. Une fois qu'elle a reconnu le matériel génétique du virus envahisseur, elle s'y lie et le rend inoffensif (en le coupant grâce à l'activité enzymatique de protéines appelées nucléases). C'est l'équivalent bactérien du système immunitaire humain. Chaque fois que la bactérie survit à une infection virale, elle archive sa séquence génétique, l'alternant avec des séquences répétées. Lorsque le virus réapparaîtra, la bactérie sera déjà prête à le vaincre : c'est un système équivalent à la vaccination. Ce système, appelé *CRISPR*, a été trouvé dans de nombreuses espèces bactériennes (40%) et dans la plupart des archéobactéries (90%) étudiées.^{989, 1051} Les bactéries remplissent également des fonctions importantes chez les abeilles grâce aux symbioses développées au cours de l'évolution : défense contre les maladies (par exemple les champignons), digestion. On a également découvert que les bactéries symbiotes des abeilles (par exemple *Bombella apis*, présente dans l'intestin de l'abeille) possèdent le système *CRISPR/Cas* pour se défendre contre les virus.¹¹²³

Le système de défense naturel présent dans les bactéries peut être reprogrammé en laboratoire pour remplir des fonctions utiles. On a découvert depuis longtemps qu'une fraction considérable de l'ADN humain (peut-être jusqu'à 8%) porte des traces d'infections qui ont eu lieu au cours des millénaires (par exemple, par des rétrovirus à base d'ARN).

Les virus sont utilisés depuis longtemps pour tenter de guérir les maladies humaines et figurent parmi les principales causes de mortalité bactérienne (il est probable que jusqu'à 40% des bactéries vivant dans les océans meurent chaque jour à cause des virus). Certains virus (bactériophages) ont été utilisés avec succès pour guérir des maladies bactériennes (des milliards de phages sont inoculés au patient pour vaincre les bactéries résistantes aux antibiotiques). Dans des essais expérimentaux, des virus ont également été utilisés pour transporter l'enzyme

nécessaire dans un être humain (par exemple dans le cerveau d'un patient atteint de la maladie de Tay-Sachs). La perfusion de fortes doses de virus a également donné lieu à de graves échecs, tels que la mort de patients.¹⁰⁵¹

Les virus ont adopté des mécanismes de contre-défense contre les mesures de protection bactériennes, comme des systèmes contre les enzymes qui désactivent le système *CRISPR*.

Il a été découvert que les virus étaient l'une des principales causes de l'inactivation (destruction) des micro-organismes commercialisés pour la fabrication de yaourts et de fromages, générant des dommages économiques considérables (par exemple, les bactéries du genre *Streptococcus*, *Lactobacillus* et *Lactococcus*).^{1029, 1051} Les bactéries résistantes à ces virus contenaient des séquences *CRISPR*, qui représentent une sorte de mémoire vaccinale. Ce système de défense antiviral nécessite des séquences à base d'ARN et des protéines qui coupent les acides nucléiques (appelées *Cas* ; il en existe des spécialisées qui coupent l'ADN ou l'ARN de différentes manières). Le système *CRISPR/Cas9*, constitué d'un complexe protéique lié à une séquence d'acide nucléique (ARN), n'est rien d'autre qu'un appareil biochimique spécialisé dans la coupure d'acides nucléiques (nucléases) tels que l'ADN, qui peut être programmé en faisant varier la séquence d'ARN (environ 20 à 30 nucléotides) ; les enzymes de restriction sont utilisées depuis longtemps pour reconnaître et couper des séquences de nucléotides, mais elles reconnaissent généralement des séquences plus courtes (6 nucléotides) et peuvent donc se tromper beaucoup plus facilement. Sans la séquence d'ARN spécifique ou sans la protéine *Cas9*, le complexe ne fonctionne pas et est donc incapable de sauver les bactéries d'une infection virale. Cependant, les virus disposent de systèmes de défense tels que des protéines (nucléase *Cas*) qui peuvent désactiver le système *CRISPR*. Plusieurs types de systèmes *CRISPR* ont été identifiés, chacun avec des spécificités différentes, et d'autres ont été créés en laboratoire pour répondre à des besoins spécifiques.

En modifiant la séquence de reconnaissance des acides nucléiques (c'est-à-dire l'ordre des bases azotées dans l'ARN) du système *CRISPR*, il est possible de diriger le système vers des sites spécifiques : il peut être reprogrammé à volonté grâce à un guide artificiel basé sur des acides nucléiques (ARN) synthétiques. Tous les êtres vivants utilisent les mêmes lettres de l'alphabet génétique (nucléotides). Cette technique revient à disposer d'un système de correction de texte capable de trouver un mot et de le modifier, par exemple en le coupant, en le supprimant ou en le remplaçant par un autre. La nature des bactéries a donc fourni aux ingénieurs moléculaires un scalpel de précision permettant de reconnaître des séquences d'ADN de quelques bases seulement (environ 20) et d'effectuer des coupures (ou des modifications) à proximité immédiate. La technique de reconnaissance n'est pas infaillible et le système de coupe peut aussi faire des erreurs. En théorie, couper un gène peut le désactiver : voici un nouvel outil pour désactiver les gènes qui produisent des protéines pathogènes. Il est également possible de voir ce qui arrive à une cellule si un morceau particulier d'ADN est coupé (désactivé). Il a également été possible d'utiliser le système pour reconnaître des séquences particulières afin de remplacer certains nucléotides et ainsi réparer ou modifier des mutations ponctuelles. Le système *CRISPR* peut être utilisé pour tenter de modifier plusieurs gènes à la fois en coupant, insérant ou supprimant des parties de l'ADN, potentiellement pour tous les êtres vivants, tant dans le règne animal que végétal.¹⁰²⁹

Une application intéressante pourrait consister à modifier les caractéristiques d'une protéine présente dans les globules blancs qui permet au virus du sida de pénétrer dans le corps. En Europe, on a découvert qu'une fraction de la population peut être naturellement résistante au VIH, grâce à la présence, en double exemplaire (homozygotie), d'une protéine mutée présente sur les membranes des cellules sanguines (appelée CCR5, avec une délétion de 32 bases). La forme non mutée de la protéine permet au virus d'entrer. Le système *CRISPR* pourrait être utilisé pour modifier le gène qui produit cette protéine dans les cellules souches afin qu'il ne permette pas au virus du sida d'y pénétrer. En théorie, on pourrait espérer rendre les patients séropositifs

résistants à l'infection (en prenant des lymphocytes, les cellules souches de type T, en les modifiant en laboratoire et en les réinjectant dans le patient).¹⁰⁵¹ Les problèmes sont nombreux, comme celui d'atteindre un grand nombre de cellules lymphocytaires du patient et de modifier correctement leur ADN sans erreurs ou altérations dans des sites non ciblés. Ces obstacles ne sont pas négligeables, mais si l'idée fonctionne, une injection d'un concentré de systèmes *CRISPR* conçus de manière appropriée suffirait à guérir. D'un seul coup, on peut espérer rendre une personne malade résistante au virus ou une personne saine résistante à l'infection.

Une autre possibilité offerte par le système de scalpel moléculaire *CRISPR* pourrait être de guérir l'anémie falciforme, qui peut être causée par une mutation d'une seule lettre dans la séquence de base du gène qui dirige la formation de la protéine connue sous le nom d'hémoglobine. Cette maladie (autosomique récessive) est due à la substitution d'un nucléotide par un autre (Thymine remplacée par une Adénine), ce qui entraîne la modification d'un seul acide aminé dans l'hémoglobine. Ce changement qualitatif est héréditaire et est responsable de la maladie. L'Italie compte entre 2.500 et 4.000 patients atteints de drépanocytose (25.000 en Europe), qui est l'hémoglobinopathie la plus répandue dans le monde.¹⁰³² Les modifications de l'hémoglobine, typiques de l'anémie falciforme, ne permettent pas au parasite responsable du paludisme (*Plasmodium falciparum*) d'exploiter les ressources cellulaires pour transporter ses protéines. En utilisant le système *CRISPR* dans des cultures de cellules portant la mutation drépanocytaire, il a été possible de corriger l'erreur et de faire passer le phénotype de la cellule de malade à sain.¹⁰²⁹ Des succès similaires ont été obtenus dans des cultures de cellules atteintes de différentes maladies telles que la mucoviscidose (cellules pulmonaires) et la dystrophie musculaire de Duchenne (cellules musculaires). L'espoir est que des thérapies génétiques seront bientôt disponibles pour traiter ces maladies graves : pour un type d'anémie, la bêta-thalassémie, une stratégie de thérapie génique a déjà été approuvée.

La technique permise par le système *CRISPR* permet potentiellement de corriger le gène défectueux avec plusieurs avantages par rapport, par exemple, à l'insertion d'une nouvelle copie fonctionnelle du gène. Il n'y a aucun risque de continuer à exprimer un gène nocif qui pourrait être transmis à la descendance. En outre, le gène défectueux, une fois corrigé, reste sous le contrôle des régulateurs naturels de l'expression génétique.

Le système *CRISPR* permet de reconnaître de petites séquences au sein des plus de 3,2 milliards de lettres (ce sont les nucléotides qui forment un alphabet génétique basé sur 4 lettres) qui composent notre ADN, lequel contient plus de 20.000 gènes. Ces informations sont contenues dans 23 paires de chromosomes dans les trillions de cellules (10^{18} trillions) qui composent notre corps. Si on écrit l'intégralité du code génétique humain, soit 3,2 milliards de lettres, dans des pages de 3.000 caractères, il faudrait imprimer plus d'un million de pages. En 2018, il a été possible de connaître la séquence exacte du génome complet d'un nouveau-né (l'ordre des 3,2 milliards de lettres composant les 4 nucléotides de l'ADN) en moins de 21 heures.^{1056, 1057} Ainsi, en un jour, il est théoriquement possible de connaître, au sein de cette encyclopédie, la présence éventuelle de mots ou de phrases incorrects (mutations, altérations), capables de générer des maladies.

En 1995, le premier génome bactérien a été séquencé et, en quelques années, il a été possible de séquencer les génomes de nombreux organismes, dont au moins 150.000 microbes. En 2001, l'ensemble du génome humain a été séquencé, en 2002 celui des souris, et en 2017 celui des pigeons voyageurs. Pour au moins trois espèces de bourdons (*Bombus terrestris*, *Bombus impatiens* et *Bombus terrestris*) et l'abeille domestique (*Apis mellifera*), les séquences complètes du génome ADN sont désormais disponibles.¹²³⁹

Un aspect étonnamment positif est la réduction des coûts nécessaires pour séquencer l'ensemble du génome humain, qui passent à moins de mille euros, et il existe déjà des séquenceurs portables de la taille d'un téléphone portable.¹⁰⁵⁸ Pour au moins un tiers des 20.000 gènes humains connus, on a identifié des erreurs (mutations) qui peuvent provoquer des maladies.¹⁰⁵¹

Grâce au système *CRISPR* sur des animaux de laboratoire, il a été possible de désactiver des gènes individuels (c'est comme trouver et modifier des mots individuels dans cette encyclopédie) liés à certains types de cancer. On espère pouvoir faire de même dans le cas de certains cancers humains en les désactivant à l'aide de systèmes biotechnologiques ciblés. Des milliers d'erreurs dans les mots de cette encyclopédie (la séquence de nucléotides du génome) sont connues pour provoquer des maladies généralement rares. Un jour, il sera possible de réparer ces erreurs en les supprimant ou en les remplaçant : le système *CRISPR* permet de le tenter.

Parmi les caractéristiques gagnantes de cette stratégie de génie génétique figurent sa simplicité, sa rapidité et son rapport coût-efficacité. La technologie est utilisée à grande échelle depuis 2013, et en sept ans, il a été possible d'enregistrer plus de 5.600 publications scientifiques (celles dont le titre ou le résumé comporte la mention *CRISPR* sur le site *pubmed*).⁹⁹⁰ Le grand avantage du système *CRISPR* est qu'il est programmable et peut être modifié en fonction de la cible. La cible, la séquence d'ADN que l'on veut modifier, peut être choisie facilement. Il est même possible de concevoir l'opération à effectuer, comme couper (délétions), ou couper et remplacer, ou couper et coller, ou couper et insérer (insertions), ou même reconnaître la séquence et modifier les régulateurs (génétiques et épigénétiques) qui influencent l'activation des gènes (par exemple, les protéines histones auxquelles l'ADN est lié ou les promoteurs). Il est devenu possible, très rapidement, de modifier le fonctionnement de nombreux gènes simultanément, par exemple pour étudier des tumeurs chez des cobayes de laboratoire. Il est possible de faire beaucoup de choses qui étaient également possibles avec les techniques antérieures, mais le grand avantage est la rapidité combinée à la réduction des coûts.⁹⁸⁹ Il s'agit d'un scalpel moléculaire qui peut être programmé pour apporter les modifications souhaitées à des endroits prédéterminés : couper, remplacer, supprimer, insérer. En théorie, il est possible de programmer en laboratoire les séquences guides (de l'ARN du système *CRISPR/Cas9*) pour chacun des 20.000 gènes connus de l'espèce humaine ou de toute autre espèce dont les séquences génétiques sont connues. Il est donc possible d'espérer atteindre et modifier n'importe quelle séquence rapidement et à moindre coût.¹⁰⁴⁴ Cette innovation technologique a probablement été suivie d'un trop grand enthousiasme, et de nombreux espoirs sont le résultat d'une surestimation des avantages à court terme et d'une sous-estimation des effets négatifs à long terme. Mais il s'agit certainement d'un outil utile pour la recherche sur certaines maladies comme le cancer. Dans des cultures cellulaires, des tissus ou des parties d'organes (par exemple, un organoïde intestinal), il est possible de désactiver des gènes ayant une action oncogène ou anti-oncogène probable afin d'étudier leurs mécanismes d'action. Dans les lignées cellulaires, il est possible de découvrir quels gènes sont essentiels au développement ou à la prévention du cancer.¹¹⁵¹ Chez les animaux de laboratoire, il est possible de désactiver des gènes pour vérifier leur importance dans l'apparition de nombreuses maladies différentes. Il est possible de désactiver des gènes dans le zygote (ovule nouvellement fécondé) par une seule injection et d'obtenir un animal chez qui cette fonction est désactivée (par exemple chez la souris, le lapin et le singe). L'étude des modèles animaux permet d'améliorer notre compréhension des maladies humaines et ouvre de nouveaux horizons thérapeutiques et diagnostiques.

APPLICATIONS EN MÉDECINE : THÉRAPIE GÉNIQUE

Certaines applications générées par la biotechnologie sont très importantes et bien connues. Jusque dans les années 1980, l'hormone insuline (utilisée pour traiter le diabète) était extraite du pancréas des porcs et des bovins. Depuis de nombreuses années, l'insuline est produite par des bactéries spécialement conçues (par exemple *Escherichia coli*, un habitant de notre tube digestif). De la même manière, les bactéries produisent de nombreuses molécules

protéiques utiles, comme l'hormone de croissance ou certains vaccins. Il existe plus de 7.000 maladies héréditaires connues, causées par une mutation génétique, qui touchent au moins 30 millions d'Américains.¹⁰²³ Pour très peu de maladies, il existe une thérapie génique autorisée, comme celle utilisant les adénovirus, une catégorie de virus considérée comme inoffensive pour l'homme (ils sont très petits et peuvent porter une seule hélice d'ADN d'environ 5.000 nucléotides). Ces vecteurs viraux ne génèrent pas d'intégration de l'ADN qu'ils portent dans le génome et ne provoquent pas de forte réponse immunitaire : deux avantages majeurs. Il convient de remarquer que les virus n'ont pas évolué pour nous fournir des outils de thérapie génique, et que les risques sont donc nombreux. Cependant, il existe des traitements de thérapie génique approuvés qui utilisent ces virus pour traiter des maladies rares. Toutefois, dans de nombreux laboratoires du monde entier, d'autres virus (par exemple, le lentivirus) sont également utilisés pour les essais cliniques. Une expérience dangereuse est donc en cours.

Il existe également d'autres stratégies de thérapie génique qui, en général, exploitent deux stratégies possibles pour traiter les cellules somatiques, c'est-à-dire celles qui ne sont pas transmises à la descendance (par exemple, les cellules de la peau, des muscles ou du sang). La première consiste à prélever des cellules sur le patient, à les traiter en laboratoire et à les ramener chez le patient (par exemple, des cellules souches). De cette manière, il est facile d'effectuer de nombreux contrôles avant de remettre les cellules modifiées dans le corps du patient. Cette stratégie est possible pour les cellules sanguines. Cette méthode est en partie déjà appliquée, par exemple avec la greffe de moelle osseuse, mais grâce à la biotechnologie moderne, le patient n'a pas besoin de donneur (ses propres cellules sont modifiées et guéries).

Une deuxième stratégie utilise des vecteurs (par exemple, des virus modifiés) ou des scalpels moléculaires (par exemple, le système *CRISPR* composé de protéines et d'ARN) pour modifier (in vivo) les cellules cibles d'un organisme. Cette possibilité présente donc des risques beaucoup plus importants puisque l'administration doit se faire chez le patient et non sur ses cellules extraites et manipulées en laboratoire. Il existe des obstacles pour atteindre la cible sans faire d'erreurs ou modifier d'autres fonctions. Il est également possible de créer des vecteurs viraux (adénovirus) qui portent le système *CRISPR* : ils sont conçus pour atteindre des cellules cibles particulières et libérer le système *CRISPR* avec précision (par exemple, dans les cellules du foie, des poumons, de la rétine ou du système nerveux central). Chez les animaux de laboratoire (souris), il a été possible de traiter l'équivalent de la dystrophie musculaire de Duchenne humaine (une maladie génétique récessive associée au chromosome X) en injectant des vecteurs adénoviraux portant un système *CRISPR* spécialement conçu.¹⁰²⁹

Voici un résumé de quelques-unes des stratégies de thérapie génique autorisées par le système de santé pour soigner certaines maladies rares. Ces succès scientifiques contribuent au maintien d'une industrie très riche, qui dispute des milliards de dollars de litiges juridiques pour s'approprier l'exclusivité des brevets pour des systèmes biologiques tels que ceux présents dans les bactéries depuis des millions d'années (par exemple *CRISPR*).

LA THÉRAPIE GÉNIQUE EST DÉSORMAIS UNE RÉALITÉ : LE CAS DU TRAITEMENT *STRIMVELIS*

Voici un exemple de traitement génétique autorisé en Europe. Un gène défectueux hérité des deux parents (homozygote récessif) altère la production de lymphocytes chez les enfants. La maladie peut être améliorée grâce à un donneur de moelle, sinon les enfants doivent vivre dans un environnement isolé des microbes, qui les tueraient. Ce traitement (*Strimvelis*) est indiqué pour le traitement des patients présentant une immunodéficiência sévère (déficit en adénosine désaminase ou ADA et immunodéficiência combinée sévère ou SCID), pour lesquels un donneur de cellules souches HLA (antigène leucocytaire humain) consanguin approprié n'est pas

disponible.⁹⁹⁴ Cette immunodéficiencia (ADA-SCID) est une maladie extrêmement rare avec un début typiquement infantile (l'incidence de la maladie est estimée à 1-5 cas pour 1.000.000 de nouveau-nés).⁹⁹⁵ La thérapie génique de *Strimvelis* utilise les cellules souches du patient, qui sont prélevées et modifiées pour produire la protéine normale (l'enzyme ADA). Une fois les cellules traitées (elles sont modifiées à l'aide de virus), elles sont conservées chez le patient et, après s'être fixées dans la moelle osseuse, génèrent de nouvelles cellules actives dans la production de l'enzyme (les propres cellules du patient sont modifiées à l'aide d'un vecteur rétroviral contenant la séquence d'ADNc¹).⁹⁹⁴

En Europe, on estime que 15 enfants par an naissent avec cette maladie qui, si elle n'est pas traitée, entraîne une issue fatale avant même d'atteindre l'âge scolaire ; le coût de la thérapie est de 594.000 euros par patient. Cette thérapie génique est autorisée en Italie depuis plusieurs années : l'Agence italienne du médicament a approuvé en 2016 le remboursement de *Strimvelis*, une thérapie génique *ex vivo* à base de CD34 et de cellules autologues. Si les patients italiens ne ressentent pas les bienfaits escomptés au fil du temps, l'entreprise qui produit la thérapie sera obligée de rembourser l'intégralité du montant au Servizio Sanitario Nazionale italien.^{993, 996}

L'histoire de ce traitement, qui utilise des virus manipulés en laboratoire pour modifier des cellules souches malades prélevées sur le patient, est étonnante. Parmi les avantages de cette stratégie, deux peuvent être soulignés :

- La manipulation des cellules à l'aide de virus a lieu dans un environnement contrôlé, en laboratoire. Il s'ensuit qu'il est possible d'effectuer des contrôles avant de replacer les cellules extraites du patient dans celui-ci.
- Le virus conçu pour générer les modifications génétiques souhaitées ne circule pas dans le corps humain.

Cette maladie étant heureusement très rare, les bénéficiaires potentiels sont très peu nombreux. Il convient de souligner qu'il s'agit d'un traitement très coûteux, qui ne serait pas accessible sans un soutien financier tel que celui fourni par le service de santé italien. Combien, parmi les 15 patients européens possibles, pourraient se permettre de dépenser près de 600.000 euros pour espérer une guérison ? Il est intéressant de remarquer que l'accord entre le fabricant et le service de santé prévoit le remboursement des coûts si l'état du patient ne s'améliore pas. Cette garantie devrait être étendue à tous ces traitements, quel que soit leur coût.

UN ÉCHEC : LE TRAITEMENT *GLYBERA*

Le coût de la thérapie génique, qui est généralement destinée à traiter des maladies rares, constitue une limitation majeure. Il s'agit de solutions très coûteuses, souvent destinées à un petit nombre de patients. C'est le cas du traitement *Glybera*, qui a été le premier exemple de thérapie génique autorisé en Europe en 2012, avant d'être retiré en 2017. Le médicament a été mis au point contre le déficit en lipoprotéine lipase (*Lpld*), qui est à l'origine d'une maladie rare : il s'agit d'une pancréatite touchant une personne sur environ un million, dans laquelle le patient est dépourvu d'une enzyme qui permet de digérer les graisses. Chez les patients, le gène codant pour l'enzyme ne fonctionne pas, ce qui les oblige à suivre un régime alimentaire ne contenant que 20% des graisses nécessaires. Dans les cas les plus graves, pour lesquels il a été approuvé, les patients souffrent de pancréatites récurrentes. Les muscles sont le lieu de synthèse de ce type de protéine lipase, une enzyme qui est libérée dans le sang, où elle contribue à maintenir la concentration des graisses à un niveau bas (les globules gras formés de triglycérides, liés à des protéines, sont dissous) : l'absence de cette enzyme entraîne une augmentation énorme de la

¹ En biologie moléculaire, l'ADN complémentaire (abrégié en ADNc) est synthétisé à partir de l'ARN messager, c'est-à-dire qu'à partir d'un acide nucléique à simple hélice, on obtient un acide nucléique à double hélice.

concentration de lipides dans le sang, ce qui provoque une pancréatite. Ce traitement est devenu célèbre pour être le plus cher du monde : plus d'un million de dollars.^{997, 1091} Il a été retiré en 2017, alors qu'il avait été présenté comme une avancée vers la disponibilité de thérapies efficaces pour des maladies très rares pour lesquelles il n'existe encore aucun traitement spécifique ; en Europe, il n'a probablement été administré qu'à un seul patient et dans le monde à 31 patients (dont 27 participants à des études préliminaires), dont un seul a payé et assuré.^{998, 1051, 1091}

La préparation *Glybera* consistait en un virus vecteur spécial (AAV1), dans lequel était insérée la séquence d'ADN normale du gène de la lipoprotéine lipase humaine (gène LPL). La préparation a été injectée dans les muscles de la jambe. Les limites à l'utilisation du médicament étaient le coût impossible (initialement de 1.600.000 euros, puis réduit à 1 million d'euros) et certains doutes quant à son efficacité réelle. Dans ce cas, il n'a été possible de documenter les éventuels effets bénéfiques que sur quelques patients et dans un court intervalle de temps.⁹⁹⁹

THÉRAPIE GÉNIQUE *ZOLGENSMA*

L'atrophie musculaire spinale (SMA) est une maladie neuromusculaire génétique rare (récessive) causée par l'absence d'un gène fonctionnel (SMN1), entraînant une perte rapide et irréversible de motoneurons, qui altère la fonction musculaire, notamment la respiration, la déglutition et les mouvements de base. En Europe, environ 550 à 600 enfants naissent chaque année avec une amyotrophie spinale ; en Italie, l'incidence est estimée à 1 pour 10.000 naissances vivantes, on estime donc qu'environ 40/50 enfants naissent chaque année avec la SMA, qui est une cause génétique de mortalité infantile (75% des enfants atteints de cette maladie meurent avant leur 14e mois).^{1013, 1017} En l'absence de traitement, la SMA de type 1 entraîne le décès ou la nécessité d'une ventilation permanente avant l'âge de deux ans dans plus de 90% des cas.¹⁰¹⁴ L'Agence italienne des médicaments a inclus *Zolgensma* (*onasemnogene abeparvovec*), la première thérapie génique pour l'amyotrophie spinale (SMA), dans la liste des médicaments qui seront pris en charge par le Service national de santé pour les traitements dans les six premiers mois de la vie des patients. Le traitement n'est administré qu'une fois dans la vie par injection intraveineuse : les adénovirus (AAV9) sont porteurs d'une nouvelle copie entièrement fonctionnelle du gène SMN1. Environ $1,1 \times 10^{14}$ vecteurs viraux par kilogramme de poids corporel sont injectés dans la circulation veineuse des nouveau-nés (le nouveau gène est régulé par un promoteur de *bêta-actine* de poulet et forme un élément génétique extra-chromosomique dans les motoneurons, avec une probabilité réduite d'insertion de l'ADN du patient).^{1016, 1017} Au moins 700 patients ont été traités avec cette stratégie (aux États-Unis, cette thérapie génique a été approuvée en 2019). Au départ, le coût de ce traitement était de plus de 2 millions de dollars.¹⁰¹⁵

THÉRAPIE GÉNIQUE *LUXTURNA*

Le Luxturna est indiqué pour le traitement des patients adultes et pédiatriques présentant une perte de vision due à une dystrophie rétinienne héréditaire et disposant d'un nombre suffisant de cellules rétiniennes viables (cette maladie est causée par des mutations bialéliques confirmées du gène RPE65, qui produit une protéine nécessaire au fonctionnement des cellules rétiniennes).¹⁰¹⁸ Il s'agit d'un médicament qui est injecté sous la rétine de l'œil des adultes et des enfants en une seule fois (contient 5×10^{12} vecteurs viraux par millilitre).^{1019, 1020} En une seule administration, il améliore la capacité de vision des patients. Cette thérapie est également basée sur l'utilisation d'un virus adéno-associé (AAV) comme vecteur. Les maladies rétiniennes héréditaires sont multiples et liées à des mutations dans plus de 250 gènes : cette mutation

bialélique spécifique touche une personne sur 200.000 ; aux États-Unis, il y a probablement entre 1.000 et 2.000 malades potentiels qui pourraient bénéficier de cette thérapie.¹⁰⁹¹ Un diagnostic précoce, à un stade précoce de la maladie, et un nombre suffisant de cellules rétiniennes viables sont essentiels à la réussite du traitement. Aux États-Unis, le médicament coûte 425.000 dollars par œil et a été approuvé en 2017.^{1021, 1022}

THÉRAPIE GÉNIQUE ZYNTGLO

La bêta-thalassémie transfusionnelle est une maladie chronique, mieux connue sous le nom d'anémie méditerranéenne, qui touche plus de 6.500 personnes rien qu'en Italie.¹⁰²⁸ La bêta-thalassémie est une maladie génétique rare du sang, bien qu'elle soit assez fréquente dans le bassin méditerranéen et notamment en Italie, où l'on estime à trois millions le nombre de porteurs sains. Elle est causée par une mutation du gène codant pour la protéine de l'hémoglobine, ce qui oblige les patients dans ses formes les plus graves à recevoir de fréquentes transfusions sanguines et à gérer la maladie non seulement en termes de conséquences physiques, mais aussi en termes de santé mentale et d'inclusion sociale. *Zynteglo* est indiqué pour le traitement des patients âgés de 12 ans et plus atteints de bêta-thalassémie dépendante des transfusions (ils doivent présenter certaines caractéristiques spécifiques).¹⁰²⁴ Il est administré par voie intraveineuse à l'aide de cellules souches hématopoïétiques prélevées sur le patient lui-même et génétiquement modifiées en laboratoire à l'aide d'un vecteur viral (lentivirus) qui fournit le gène de la bêta-globine fonctionnelle.^{1025, 1026} Les cellules souches génétiquement modifiées sont implantées dans la moelle osseuse du patient. Cette thérapie est également très coûteuse : plus de 1,5 million d'euros en Europe.¹⁰²⁷

En 2020, plus de 900 stratégies de thérapie génique possibles ont été enregistrées aux États-Unis : en moins de vingt ans, les traitements basés sur la thérapie génique se sont considérablement développés.¹⁰⁵¹

Le problème du coût des médicaments pour les maladies rares est plus crucial que jamais et n'a pas encore trouvé de solutions raisonnables et éthiquement acceptables. En outre, il est très difficile de prévoir les effets à long terme, générés par exemple par l'injection de vecteurs viraux (virus modifiés) dans l'organisme. Les techniques biotechnologiques sont probablement encore trop peu testées pour espérer les employer systématiquement pour prévenir les maladies génétiques dans l'espèce humaine.

Un autre aspect est également sous-estimé : nous ne connaissons pas tous les effets positifs de certains génotypes que nous considérons comme négatifs. Pour comprendre de quoi il s'agit, nous pouvons prendre l'exemple bien connu de la résistance au paludisme conférée par la drépanocytose. On estime que cette mutation, qui est présente dans au moins 300.000 nouvelles naissances par an, est apparue il y a environ 7.300 ans en Afrique. Après 250 générations, il s'est répandu car il confère une résistance au paludisme.

Même la présence d'un seul gène porteur de la mutation de la mucoviscidose génère peut-être un avantage, comme une capacité accrue à se défendre contre la tuberculose. Malheureusement, nous ne disposons pas de connaissances suffisantes pour prédire les effets à long terme de changements irréversibles tels que ceux qui se produisent dans la lignée germinale des humains. L'évolution, avec un travail incessant sur plusieurs milliards d'années, a produit le génome humain. Nous sommes très présomptueux si nous croyons que des groupes d'êtres humains capables de manipuler notre génome peuvent effectuer des changements irréversibles sans générer de conséquences indésirables et très probablement négatives. Le même principe s'applique aux changements irréversibles dans la génétique des espèces avec lesquelles nous partageons la planète.

Les thérapies géniques actuellement sur le marché sont très coûteuses, comportent des risques largement inconnus et peuvent être utilisées pour traiter des maladies qui touchent très peu de personnes : entre un nouveau-né sur 20.000 et un sur un million. Les bénéficiaires potentiels de ces technologies sont donc peu nombreux et doivent être riches. D'autres stratégies moins coûteuses, telles que l'analyse génétique prénatale, effectuée chez les parents ou l'embryon lors de la procédure de FIV ou pendant la grossesse, peuvent prévenir la souffrance de manière efficace et durable. La prévention coûte moins cher et peut être utilisée pour évaluer de nombreux risques différents, comme c'est déjà partiellement le cas (par exemple pour le diagnostic précoce des trisomies dans les embryons). Il s'ensuit que les technologies de thérapie génique, potentiellement risquées et coûteuses, ne sont probablement pas nécessaires. Il existe déjà un certain nombre d'exemples de sociétés qui ont dû retirer leurs thérapies du marché, en partie parce qu'elles n'ont pas été en mesure de réaliser les bénéfices escomptés. Les solutions plus simples et plus sûres sont également meilleures parce qu'elles sont moins coûteuses.

LA SÉLECTION HUMAINE ARTIFICIELLE : PROGRAMMER SON DESTIN GÉNÉTIQUE

Les nouvelles applications scientifiques, telles que celles offertes par le génie génétique, deviennent moins chères et plus accessibles. Il en résulte une possibilité d'expérimentation plus facile et plus étendue et, parallèlement, un plus grand nombre d'applications utiles, par exemple dans le domaine de la santé. En même temps, cependant, il devient plus difficile de contrôler ce qui se passe dans les laboratoires du monde entier. Le génie génétique permet de corriger les cellules malades en modifiant les gènes qui sont réparés ; il est également possible de remplacer le mauvais gène par un gène sain, ou encore d'ajouter un gène fonctionnel au gène malade. Il est possible d'éteindre les gènes négatifs ou d'allumer les gènes positifs.

Depuis plusieurs années, des êtres humains naissent partout dans le monde grâce aux technologies qui permettent de dépasser les limites imposées par la nature. Grâce aux examens effectués pendant la grossesse, il est possible de diagnostiquer des maladies et d'éviter des coûts sociaux et des souffrances énormes (amniocentèse, villocentèse, cordonocentèse, échographie, examen de l'ADN dans le sang de la mère, examen des marqueurs biochimiques dans le sang de la mère comme le dosage de l'alpha feto-protéine).^{1088, 1089, 1090} Grâce à ces techniques, il a été possible de réduire l'incidence de maladies telles que le syndrome de Down. L'innovation offre toujours de nouveaux horizons, et les scalpels moléculaires permettent de pénétrer et de modifier les codes qui régissent la vie. Cela signifie que les êtres humains qui ne sont pas aptes à la procréation peuvent être mis dans une position artificielle pour produire des enfants sains. Voici quelques exemples.

LA FÉCONDATION ASSISTÉE

Pour la première fois, en 1978, il est devenu possible de procréer grâce à des techniques de laboratoire : l'insémination artificielle (connue sous le nom de fécondation *in vitro*). De nombreux couples bénéficient aujourd'hui de la procréation assistée pour résoudre des problèmes d'infertilité ou d'éventuelles maladies héréditaires. Dans le monde, en moins de 30 ans, au moins huit millions d'enfants sont nés grâce à la procréation assistée (fécondation *in vitro*). Avec la fécondation assistée, il est possible de choisir le sexe de l'embryon, ce qui signifie qu'il est possible d'éviter les maladies associées aux chromosomes sexuels comme le chromosome Y (il générera un mâle). Les gamètes fournis par un donneur peuvent être utilisés pour surmonter d'autres obstacles. Il est possible de se faire prêter un utérus pour mener une grossesse à terme chez une mère autre que celle qui a fourni l'ovule. Enfin, les embryons

obtenus par insémination artificielle qui ne sont pas utilisés peuvent être conservés (cryoconservation) et utilisés à des fins de recherche ou pour de futurs programmes de procréation, même pendant des années.

La procréation assistée est utilisée avec succès depuis trente ans pour éviter les maladies liées au sexe. Grâce à cette procédure, il est possible de programmer le sexe et d'éviter les maladies associées aux chromosomes sexuels, comme la dystrophie musculaire de Duchenne, qui touche principalement les hommes. En 1992, la fécondation assistée a probablement été utilisée pour la première fois avec succès pour sélectionner un embryon qui n'avait aucune chance de développer une maladie grave dont les parents étaient porteurs sains (ils avaient déjà conçu un enfant malade) : la mucoviscidose.¹⁰⁹¹ Aujourd'hui, l'analyse génétique préimplantatoire peut être utilisée pour prévenir de nombreuses maladies telles que l'hémophilie, la thalassémie et le syndrome de Huntington. Ainsi, ces techniques sont utilisées pour sélectionner artificiellement des embryons obtenus en laboratoire.

ENFANTS DE TROIS PARENTS

Les mitochondries sont des organelles dans nos cellules qui sont importantes pour de nombreuses fonctions telles que la production d'énergie par la respiration. Ces organites possèdent leur propre génome chromosomique supplémentaire. L'ADN mitochondrial contient quelques gènes, mais très importants, et s'ils ne fonctionnent pas, cela peut entraîner des maladies graves ou des changements incompatibles avec la vie (problèmes musculaires, cécité, dysfonctionnement cardiaque). Les mitochondries ne sont pas contenues dans le spermatozoïde et sont donc héritées uniquement par la mère. Pour éviter une maladie génétique héréditaire transmise par les mitochondries de la mère, il suffit de les remplacer par celles d'une femme donneuse saine. L'enfant aura donc les gènes de trois parents : les gènes chromosomiques des deux parents et les gènes mitochondriaux d'un donneur. Ces enfants sont donc obtenus par fécondation assistée grâce à la collaboration génétique de trois individus : deux femmes et un homme (le père, qui n'influence cependant pas le patrimoine mitochondrial). La transplantation mitochondriale remet en question le concept traditionnel de la famille biparentale ; dans ce cas, deux mères et un père. Au Royaume-Uni, la pratique du remplacement des mitochondries a été autorisée, pour prévenir les maladies, en 2015 (elle a probablement été appliquée pour la première fois avec succès en laboratoire en 1997).^{1029, 1091} Les embryons obtenus par cette technique peuvent être congelés jusqu'à ce que le pays où ils ont été produits autorise leur implantation et donc la naissance, ou ils peuvent être déplacés vers des pays où cela est autorisé.¹⁰⁹¹

HUMAINS GÉNÉTIQUEMENT MODIFIÉS AVEC LE SYSTÈME CRISPR

Le clonage et la modification permanente de la lignée germinale des humains sont techniquement possibles depuis plusieurs années. La célèbre brebis (Dolly) a été clonée en 1996 et les premiers singes ont été clonés il y a au moins 20 ans.¹⁰²⁹ La biotechnologie permet de transgresser les lois naturelles (ou divines) en autorisant la sélection artificielle de caractéristiques génétiques telles que le sexe, mais aussi de nombreux génotypes régulés par des gènes uniques (et les phénotypes qui en résultent). Les moyens de réaliser l'eugénisme sont de plus en plus nombreux, bon marché, accessibles et, par conséquent, rapides et incontrôlables. La modification artificielle de la lignée germinale humaine devrait être interdite, mais cette option est utopique.

La sélection contre nature de caractéristiques génétiques peut facilement glisser vers des déviations dangereuses, mais il sera impossible d'interdire l'utilisation de biotechnologies simples et bon marché : elles peuvent toujours être utilisées secrètement. Tout comme les paradis fiscaux et le tourisme sexuel existent, nous découvrirons bientôt que les cliniques eugéniques sont très répandues. Le tourisme médical pour la procréation assistée est déjà une réalité, car il est réglementé de manière restrictive dans de nombreux pays, de sorte que ceux qui le peuvent émigrent vers des rivages plus libéraux.

Un principe pourrait être de privilégier la stratégie de la fécondation assistée combinée au diagnostic génétique prénatal (préimplantation), visant à écarter les embryons porteurs de maladies connues dans la famille. Cependant, dans de nombreux pays, même le diagnostic génétique préimplantatoire a été interdit (dans certains cas, il existe des exceptions : il est autorisé s'il vise à éviter certaines maladies comme celles associées au chromosome X).¹⁰²⁹ La procréation assistée et le diagnostic génétique préimplantatoire permettent toutefois de pratiquer l'eugénisme : il est possible d'écarter, parmi les embryons disponibles, ceux qui présentent les pires caractéristiques génétiques.

En 2018, un groupe de chercheurs chinois a publié un résultat stupéfiant qui a en même temps soulevé de nouvelles questions éthiques. Un tabou a été brisé : des jumeaux génétiquement modifiés sont nés. Il s'agit de deux embryons humains obtenus par procréation assistée et modifiés à l'aide de la technique CRISPR.¹ Avec cette publication, nous pouvons affirmer être entrés dans l'ère de l'eugénisme moléculaire. La modification permanente de la lignée germinale devrait être interdite. Il faut espérer que la chance a aidé les deux nouveau-nés (et les chercheurs qui les ont créés), car la procédure biotechnologique n'est pas sans incertitudes et donc sans erreurs possibles (par exemple, mosaïcisme, dommages indésirables à l'ADN). Dans des laboratoires chinois, à l'aide du système CRISPR, deux copies d'un gène (CCR5) ont été modifiées de manière à pouvoir espérer rendre deux embryons féminins résistants à l'infection par le VIH. Les jumeaux ont été obtenus par la technique de la fécondation in vitro, d'un père séropositif et d'une mère séronégative. Le zygote a été artificiellement modifié génétiquement pour créer une condition qui existe naturellement chez une fraction de la population et qui confère une résistance au SIDA (la délétion de 32 nucléotides dans le gène CCR5 existe naturellement chez au moins 100 millions de personnes).^{1059, 1060} Les jumeaux sont différents et, si tout s'est passé comme prévu, ils devraient avoir acquis la capacité de résister au VIH, même dans la lignée des cellules germinales (l'un est homozygote et l'autre hétérozygote pour la délétion souhaitée dans le gène CCR5 et tous deux présentent probablement un mosaïcisme ; ainsi, chez l'un des jumeaux, une copie du gène ne comporte pas la délétion).¹⁰⁵¹ Afin de confirmer que la procédure de génie génétique a fonctionné, il faudrait que les jumeaux rencontrent le virus du sida et qu'il soit confirmé qu'il n'y a pas de problèmes indésirables (par exemple, des dommages au génome qui peuvent être constatés par séquençage ou au fil du temps). En observant l'état de santé, on pourrait découvrir que la manipulation génétique (la double mutation artificielle du gène CCR5) a modifié, positivement ou négativement, des fonctions considérées comme totalement étrangères, telles que les fonctions cognitives ou l'espérance de vie. En réalité, ils devraient continuer à participer à une expérience de durée de vie.

Si tout se passe comme l'espéraient les chercheurs chinois, les deux jeunes filles pourront un jour transmettre cette caractéristique à leurs enfants. Il s'agit des premiers êtres humains génétiquement modifiés largement médiatisés. Il faut rappeler que le SIDA a infecté au moins 37 millions de personnes dans le monde et que, heureusement, les traitements ont fait d'énormes progrès, il est donc inutile de prendre de tels risques.

¹ Le principal chercheur chinois de cette application très contestable sur le plan éthique a été condamné à trois ans de prison.^{1052, 1061}

Même si des interdictions sont promues, il sera difficile d'arrêter l'application de modifications génétiques dans les cellules reproductrices humaines, c'est-à-dire la génération d'altérations permanentes. À l'avenir, les expériences de modification génétique humaine pourraient réserver bien des surprises.

LA BIOTECHNOLOGIE NOUS AIDERA-T-ELLE OU AGGRAVERA-T-ELLE LES CHOSES ?

Les nouvelles biotechnologies permettent de jouer avec la loterie de la reproduction naturelle, en la guidant pour atteindre des objectifs spécifiques. Les chercheurs ont réussi à cloner de nombreux animaux, des moutons aux taureaux en passant par les singes. En théorie, les technologies du génie génétique peuvent, pour la première fois, offrir l'espoir d'éradiquer les maladies génétiques héréditaires de l'humanité (et au-delà). Il suffirait d'intervenir sur tous les porteurs d'une maladie génétique qui peuvent se reproduire. Comme ce fut le cas pour certaines infections éradiquées par la vaccination de masse, le génie génétique pourrait, dans un avenir proche, nous aider à réduire l'incidence de certaines maladies héréditaires, mais la reproduction naturelle devrait être abandonnée dans ce cas.

Les maladies qui sont des candidats de choix pour la thérapie génique ou le génie génétique, dans le but d'éliminer la maladie ou son hérédité, sont des maladies monogénétiques. Il s'agit de maladies causées par un seul gène dont les effets sont bien étudiés (il en existe plusieurs milliers). Parmi les gènes susceptibles d'être corrigés figurent ceux de la mucoviscidose et de la drépanocytose ; de nombreuses maladies (par exemple, la maladie d'Alzheimer, les maladies cardiaques) et caractéristiques (par exemple, la taille, l'intelligence) sont le résultat de l'interaction de plusieurs gènes, de sorte que la modification de ces traits héréditaires est difficile ou, pour l'instant, impossible.

Pour la première fois dans l'histoire de l'humanité, il semble qu'il sera bientôt possible de contrôler le destin génétique. Cette perspective est probablement exagérée et futuriste, mais de nombreuses applications sont déjà entrées dans les cliniques et les laboratoires du monde entier. Pourtant, le risque d'une évolution génétique auto-dirigée de l'espèce humaine est tout proche, et celle des êtres vivants domestiqués est pratiquée depuis des millénaires. La biotechnologie moderne permet d'accélérer la sélection artificielle avec des mécanismes qui n'existaient pas auparavant, car il est devenu possible de transférer des gènes entre des êtres vivants appartenant à des espèces différentes mais aussi à des règnes différents, et il est possible de construire des gènes synthétiques et des organismes génétiquement modifiés, c'est-à-dire qui n'existent pas dans la nature. Il est désormais possible d'envisager de concevoir des surhommes en laboratoire, une élite de personnes en meilleure santé, voire aux caractéristiques améliorées. Nous pouvons voir ces nouvelles possibilités comme une opportunité, mais aussi comme une attaque délibérée contre l'hérédité de la race humaine. La modification de la lignée germinale humaine est déjà une réalité dans de nombreuses applications et permet de faire un bond en avant dans l'eugénisme, c'est-à-dire la sélection artificielle des êtres humains. Les implications éthiques, sociales et écologiques sont immenses. Il s'agit de reprogrammer la machine évolutive de manière consciente et avec des risques largement inconnus ou très effrayants.

Même la recherche scientifique, qui est destinée à rester dans les laboratoires, soulève dans certains cas des questions importantes. Par exemple, dans de nombreux pays du monde, il est possible de manipuler des embryons humains jusqu'à l'âge de 14 jours. Deux semaines, c'est la ligne de démarcation morale entre les cellules et les êtres humains. L'ovule nouvellement fécondé forme le zygote, qui se reproduit pendant les premiers jours, générant des cellules capables de générer n'importe quelle autre cellule. A ce stade, il est possible, par exemple, de combiner artificiellement des cellules provenant de différents embryons et d'obtenir des

chimères, c'est-à-dire des individus obtenus à partir de zygotes différents. Bien que des recherches soient menées sur des embryons qui sont rejetés par la procédure de reproduction assistée et qui ne seront jamais implantés dans l'utérus pour donner naissance à un individu, nous pouvons être en désaccord sur le moment où un embryon acquiert les droits d'un être humain, ou sur la mesure dans laquelle il peut être considéré comme une collection de cellules à manipuler librement en laboratoire.

Les règles économiques et financières actuelles sont libérales ; s'il y a un acheteur potentiel, un vendeur apparaîtra sûrement quelque part. L'économie du capitalisme est aussi l'économie du libéralisme, si quelque chose peut être fait, il faut le faire. Dans ce genre de contexte, espérer arrêter la manipulation des caractéristiques génétiques, même des êtres humains, est vraiment difficile. Éviter d'intervenir artificiellement dans l'hérédité et, par conséquent, dans l'évolution des êtres humains devient irréaliste. Essayer de respecter les limites, les restrictions entre ce qui peut être autorisé et ce qui doit être évité à tout prix, n'est pas facile non plus. Il est difficile de définir un seuil d'acceptabilité morale et sociale universelle pour les manipulations génétiques, qu'il s'agisse d'êtres humains ou d'autres êtres vivants ; les perceptions du risque et du bénéfice matériel varient considérablement car elles sont influencées par de nombreux facteurs : culture, religion, tabous sociaux, statut social, intérêts personnels, connaissance du sujet, état de santé, etc.

Avec la biotechnologie, l'humanité a acquis une capacité sans précédent de contrôler l'évolution de sa propre espèce et des autres. Le champ des applications possibles et la puissance sont immenses et inimaginables il y a seulement quelques décennies. La conception et la création d'êtres humains génétiquement modifiés sont de plus en plus simples et bon marché. Il est probable que, plus tôt que nous ne l'imaginons, il sera possible d'insérer dans le génome humain des caractéristiques artificielles dont aucun enfant ne pourra hériter naturellement. La technologie progresse beaucoup plus vite que la capacité de la société à prendre des décisions à son sujet. L'histoire confirme que, dans l'ensemble, l'humanité n'a jamais brillé par sa générosité, son altruisme, sa coopération, son harmonie, son apaisement et son respect de la nature. Qui peut contrôler et ralentir la vitesse du progrès scientifique : la société ou la science elle-même ? Quelle est la limite entre un traitement thérapeutique qui sauve la vie et un traitement d'amélioration ou esthétique ? Comment contrôler et limiter les éventuelles applications eugéniques ?

LES TECHNOLOGIES NE SONT PAS INFALLIBLES

L'utilisation d'outils moléculaires pour modifier les embryons peut donner lieu à un certain nombre de problèmes, tant éthiques que médicaux. D'un point de vue technologique, toute innovation a toujours ses points faibles. Le système *CRISPR*, par exemple, pourrait :

- Il agit également sur d'autres sites que le site cible. Ainsi, en plus d'obtenir le résultat souhaité, il y aura des effets secondaires qui peuvent être très graves. Le système *CRISPR* construit pour corriger la mutation à l'origine de la bêta-thalassémie pourrait générer des mutations dans d'autres parties de l'ADN, provoquant de nouvelles maladies ou de nouveaux problèmes. Les scalpels moléculaires pourraient désactiver par erreur certains gènes onco-suppresseurs, favorisant l'apparition de tumeurs.
- Faire des erreurs non désirées sur le site cible.
- Il n'agit que sur une fraction des cellules cibles, générant le phénomène de mosaïcisme.

¹⁰⁴⁶ La modification des cellules somatiques (par exemple avec le système *CRISPR*) chez un adulte change l'ADN de cent millions de cellules ou plus. Dans chacune de ces cellules, les événements indésirables peuvent être différents, de sorte qu'il est plus facile d'obtenir des erreurs inacceptables (par exemple, de nouvelles tumeurs). Dans certaines cellules, la modification peut

fonctionner, mais dans d'autres non (dans certains cas, il peut suffire de modifier 20% des cellules, comme les lymphocytes T).¹⁰⁵¹ Ce risque peut être réduit en travaillant sur des cellules souches (par exemple, des cellules sanguines dans des tubes à essai), des gamètes ou des zygotes (œufs nouvellement fécondés). Malheureusement, parmi les échecs enregistrés par les applications cliniques de la thérapie génique, comme l'administration de virus modifiés pour guérir des tumeurs, figure l'apparition de nouveaux cancers : certains échecs confirment l'existence de risques considérables non évitables.¹⁰⁵¹

Pour avoir plus de chances de succès, le système *CRISPR* doit être utilisé sur des maladies monogéniques, en essayant d'inactiver le gène malade (l'inactivation est plus facile que la correction). Il devrait également suffire de désactiver le gène malade sur un petit nombre de cellules cibles, afin de pouvoir enregistrer plus facilement le changement de phénotype de la cellule malade à la cellule saine. Le système doit être très spécifique, de manière à réduire la probabilité que des changements soient générés sur des sites autres que la cible.

Toute technique peut échouer, en commettant des erreurs indésirables dont les effets peuvent ne pas être facilement détectables et prévisibles. Certains problèmes peuvent se manifester des années plus tard ou même dans les générations suivantes. Par exemple, aux États-Unis, au moins 13 millions de bovins par an se voient retirer leurs cornes et il est possible de produire des bovins génétiquement modifiés pour naître sans cette partie anatomique, mais on a découvert que l'opération biotechnologique a des conséquences alarmantes : dans leur ADN, les bovins OGM ont conservé des séquences génétiques bactériennes indésirables.^{1082, 1083} Certains pourraient faire valoir qu'il y a toujours un effet secondaire qui peut être évalué et toléré, comme c'est le cas avec l'utilisation de médicaments ou de thérapies et de traitements tels que la chirurgie.

MODIFIER LES MICRO-ORGANISMES

L'utilisation de micro-organismes en laboratoire et leur modification et manipulation délibérées présentent de nombreux risques. L'une des premières reconnaissances officielles des dangers, par la communauté scientifique internationale, remonte à 1974 : la convention d'Asilomar (en Californie). Depuis lors, l'innovation scientifique a révolutionné la capacité de manipuler et de créer des êtres vivants d'une manière qui était loin d'être prévisible. Les préoccupations soulevées il y a plus de 40 ans sont aujourd'hui largement renforcées par des outils beaucoup plus efficaces et moins coûteux.

Le laboratoire constitue un écosystème artificiel où différents micro-organismes élevés et modifiés par les scientifiques peuvent se rencontrer et rencontrer des micro-organismes sauvages (naturels). Ils peuvent également contaminer accidentellement les opérateurs ou d'autres êtres vivants dans le laboratoire. Dans le corps des animaux ou des plantes, ces microbes peuvent se modifier et échanger des informations génétiques. Le laboratoire est une source potentielle de dangers parfois imprévisibles, comme la réorganisation spontanée des microbes en d'autres formes qui pourraient être plus dangereuses. En outre, il y a toujours le danger que ces êtres microscopiques s'échappent du laboratoire. Les laboratoires sont donc des écosystèmes artificiels potentiellement très risqués. La situation est encore plus grave lorsque des microbes modifiés sont délibérément injectés dans des animaux (par exemple des insectes) et des plantes. Dans certains cas, il peut être beaucoup plus difficile de vérifier que rien ne quitte le laboratoire. Dans certains cas, les microbes sont testés directement sur des humains (par exemple, des patients volontaires en phase terminale). Nous menons une expérience dangereuse : nous jouons avec des êtres vivants tels que les microbes. Nous sommes entrés dans la gestion de la loterie génétique en envahissant l'intimité de la nature, en la perturbant par nécessité

apparente (par exemple pour soigner des maladies actuellement incurables), mais aussi par des caprices qui violent la dignité des êtres vivants et le caractère sacré de l'essence même de la vie.

CONCEPTION D'EMBRYONS HUMAINS : LE RÊVE DE L'ENFANT PARFAIT DEVIENDRA-T-IL RÉALITÉ ?

Un autre aspect important est la légitimité de réaliser des expériences sur des embryons humains issus de la procréation assistée et non destinés à la procréation. Ces embryons sont détruits après seulement quelques jours de développement dans des tubes à essai. Il est possible de modifier des embryons humains et de les cloner à des fins de recherche scientifique. Dans de nombreux pays du monde, l'implantation *in utero* d'embryons humains manipulés ou clonés est expressément interdite (par exemple en Italie). D'autres pays ont des politiques ouvertes ou peu de restrictions, de sorte que ces technologies, qui sont de plus en plus bon marché et accessibles, pourraient facilement être utilisées : au grand jour ou en secret.

L'humanité devrait adopter le principe de ne pas modifier la lignée germinale humaine. Il sera difficile de garantir le respect de ce principe même si tous les pays du monde adoptent des réglementations et des mesures appropriées, car la technologie devient de moins en moins chère. C'est comme interdire la copie de fichiers musicaux dans une société où pratiquement tout le monde peut facilement se procurer les outils appropriés pour le faire. Par conséquent, nous ne devrions pas nous demander si mais quand des manipulations seront effectuées sur des embryons humains. Nous devrions probablement nous poser une question plus subtile : à quelles fins la modification du patrimoine génétique humain doit-elle être limitée ? Dans le cas de maladies graves, de nombreuses personnes sont dans le doute, en premier lieu les patients et leurs familles. Pour les moins graves, comme l'albinisme et certains types de surdité, que faire ? Les règles sont-elles nécessaires pour les caractéristiques esthétiques ou celles qui pourraient améliorer les capacités naturelles telles que les aptitudes athlétiques, mathématiques, musicales ou de mémoire ? On peut espérer qu'un jour nous pourrions également agir sur les gènes qui influencent le comportement (par exemple, l'altruisme) et l'intelligence. Il est possible d'imaginer qu'à l'avenir, il sera possible d'améliorer les capacités humaines (intelligence, force, espérance de vie, réduction du besoin de sommeil, immunité et résistance à certaines maladies) ou de mettre en œuvre une sélection artificielle de caractéristiques esthétiques (couleur de la peau, couleur des yeux). Certaines applications sont certes éthiquement moins tolérables, comme l'amélioration de certains comportements, mais elles sont aussi les plus difficiles car ces traits sont influencés par de nombreux gènes et des mécanismes complexes qui impliquent une grande influence de l'environnement. Il est difficile de manipuler artificiellement des traits qui sont définis par de multiples facteurs, dont certains sont héréditaires et d'autres résultent de facteurs environnementaux : alimentation, éducation, style de vie, expérience, traumatisme, maladie, relations sociales, climat, etc. De nombreux traits sont régulés par les interactions de nombreux gènes avec des facteurs environnementaux (par exemple, l'intelligence, la taille), de sorte qu'il semble actuellement difficile d'espérer les modifier à volonté par de simples techniques de génie génétique.

L'un des pires cauchemars pourrait être celui de l'intervention du gouvernement dans la planification de la procréation. Malheureusement, l'histoire humaine a déjà connu de tels moments sombres (par exemple, la stérilisation obligatoire aux États-Unis jusque dans les années 1970). Nous devons être en mesure d'empêcher qu'ils ne se reproduisent. Abandonner la loterie de l'évolution pour des changements planifiés et intentionnels aura certainement des conséquences désastreuses. Imaginer la conception d'une société souhaitable en essayant de prévenir ou d'éliminer les indésirables est insensé et effrayant. Ces stratégies accroissent la discrimination, la marginalisation et les inégalités, et peuvent réduire la diversité génétique et la

liberté des choix reproductifs. Paradoxalement, la réduction de la biodiversité, potentiellement causée par la conception d'une descendance idéale et parfaite, diminue la capacité à résister au changement et peut augmenter les risques de maladies, y compris génétiques. Ces aspects ne doivent pas être sous-estimés.

Le paradoxe de Peto est l'observation, du nom de Richard Peto, qu'au niveau de l'espèce, l'incidence du cancer ne semble pas être liée au nombre de cellules dans un organisme.¹⁰⁸⁶ Par exemple, l'incidence du cancer chez l'homme est beaucoup plus élevée que chez la baleine ou l'éléphant, bien qu'ils aient beaucoup plus de cellules que l'homme (en supposant qu'il soit facile d'étudier l'incidence du cancer chez des animaux qui, par ailleurs, seront bientôt exterminés). Si la probabilité de la carcinogenèse cellulaire était constante, on s'attendrait à ce que les baleines aient une incidence de cancer plus élevée que les humains. Le risque de cancer et la taille corporelle semblent être positivement corrélés chez les membres d'une même espèce, même lorsque les autres facteurs de risque sont contrôlés. On a découvert que des animaux tels que les éléphants contiennent de nombreuses copies de gènes oncosuppresseurs, similaires à ceux que l'on trouve chez l'homme. Il est probablement possible d'espérer une moindre probabilité d'avoir des tumeurs en renforçant artificiellement l'action de ces gènes qui sont naturellement présents dans notre corps.

Il existe déjà des cliniques de procréation assistée qui offrent des services spéciaux : les parents peuvent choisir la couleur de leurs yeux et d'autres caractéristiques s'ils le souhaitent.⁹⁹² À l'avenir, il sera peut-être possible d'améliorer des capacités telles que les aptitudes athlétiques (musculaires) ou autres. Peut-être que ces applications plus discutables sur le plan éthique, comme celles utilisées pour l'amélioration esthétique ou la mise en valeur des dons naturels, seront les plus recherchées. La raison en est simple. Aujourd'hui, les techniques de fécondation assistée accompagnées d'analyses génétiques permettent d'éviter la naissance d'enfants malades et, en même temps, de sélectionner parmi eux des embryons sains. L'ingénierie d'un embryon humain pour éviter une maladie héréditaire est donc beaucoup plus dangereuse et incertaine que l'application des techniques de reproduction assistée et l'analyse génétique préimplantatoire. Pour les maladies monogénétiques en particulier, l'analyse préimplantatoire est certainement une voie plus simple et moins risquée : les analyses génétiques sont effectuées sur quelques cellules prélevées sur l'embryon quelques jours après la fécondation (au cinquième jour, il peut être constitué de moins de 300 cellules). Cette stratégie est plus simple que l'ingénierie d'embryons humains et, pour de nombreuses applications, elle est éprouvée par des années de succès. Cependant, elle présente des inconvénients : elle est coûteuse, elle est invasive (pour la femme) et il n'y a pas de garantie de succès à 100%.

La sélection d'aspects esthétiques ou de caractéristiques telles que le tissu musculaire peut être mise en œuvre en modifiant les embryons. Pour la première fois, les moyens existent pour poser la question : qui a le droit de choisir qui est apte à vivre et qui ne l'est pas ? Qui trace la ligne entre l'amélioration génétique artificielle pour éviter la souffrance et les autres choix ?

Nous devrions probablement réfléchir à une interdiction absolue de la modification volontaire des lignées germinales humaines, mais autoriser l'utilisation de la biotechnologie pour des raisons de santé dans des lignées cellulaires qui ne peuvent être héritées par la génération suivante.

Il existe des entreprises qui, après avoir séquencé les caractéristiques génétiques des parents potentiels (par exemple en prélevant des échantillons de salive), sont en mesure d'établir la probabilité d'avoir des maladies génétiques ou la prédisposition à des maladies multifactorielles (en fait, certaines prédictions peuvent être utiles et réalisables même après la naissance).¹⁰⁸⁷ Il est également possible de choisir parmi différents donneurs (par exemple de sperme) celui qui correspond le mieux à vos attentes de l'enfant parfait : en bonne santé, beau, grand, intelligent et fort.^{1084, 1085} Les enfants personnalisés sont conçus à l'aide d'algorithmes spéciaux qui appliquent des modèles statistiques mathématiques. Théoriquement, en choisissant

le ou les donneurs, il est possible de sélectionner de nombreuses caractéristiques et d'essayer d'éviter plus de 1000 maladies génétiques dont le génotype est connu : depuis quelques années, les dérives eugéniques sont ouvertes. Dans cette perspective, la procréation n'est plus naturelle car elle est trop dangereuse et incertaine. Les tests de pré-fécondation permettent de sélectionner certaines caractéristiques génétiques souhaitées et d'en écarter d'autres.

Les applications qui promeuvent l'eugénisme et toutes les pires conséquences que nous pouvons imaginer devraient être interdites. Dans le passé, il a été possible de restreindre les applications de la biotechnologie avec des implications éthiques considérables. Les cellules souches sont un outil potentiel pour guérir de nombreuses maladies, mais certaines stratégies prometteuses impliquent de sacrifier des embryons humains. Heureusement, cette stratégie a été interdite dans les cas où des embryons humains sont nécessaires.¹⁰⁹¹

Cette perspective eugénique creuse le fossé entre les différentes classes sociales. Tout le monde ne peut pas s'offrir des tests préimplantatoires ou ne pourra pas se permettre une aide pour la modification d'un embryon. Il sera difficile de prendre des décisions qui tiennent compte des différentes sensibilités religieuses et culturelles, mais une chose est sûre : ces technologies vont accroître les inégalités. Dans une perspective futuriste, on pourrait imaginer une société composée de castes génétiquement prédéterminées, un peu comme ce qui se passe naturellement chez les insectes. Chez les fourmis, les différences de taille et de structure corporelle peuvent être considérables, notamment parce qu'elles sont destinées à remplir des fonctions totalement différentes. La biotechnologie moderne ne sert qu'à exacerber les problèmes brûlants auxquels l'humanité a toujours été confrontée sans trouver de solution.

Nous avons profané le temple de la vie et nous entrons dans l'ère du biocapitalisme qui va accroître les différences. Le faible coût et la plus grande simplicité permettent d'accélérer la recherche scientifique : ce sont des avantages. D'un autre point de vue, il est très inquiétant que l'innovation technologique réduise les coûts et rende les outils de génie génétique toujours plus faciles à utiliser. Les super laboratoires ne sont pas nécessaires pour modifier de façon permanente un animal ou une plante.¹⁰²⁹ Par exemple, quelques centaines d'euros permettent d'acheter un système *CRISPR/Cas9* qui peut être utilisé avec un équipement simple pour modifier le génome des êtres vivants, y compris les humains.^{1012, 1044, 1045, 1051} D'une certaine manière, on peut dire que l'innovation dans ce domaine rend la science plus accessible et plus démocratique. En conséquence, il devient de plus en plus difficile, voire impossible dans certains cas, de prévenir les abus ou les situations dangereuses, comme la dissémination dans l'environnement d'organismes créés en laboratoire. Parmi les applications inutiles et dangereuses qui pourraient en résulter, il y a ce que l'on appelle le *gene-art* ou le génie génétique au service de quelque chose que l'on appelle à tort l'art (par exemple, des plantes et des animaux luminescents, comme les lapins). Un caprice qui pourrait coûter cher.

DES APPLICATIONS ÉTONNANTES ET EFFRAYANTES : IL N'EST NI DURABLE NI RAISONNABLE D'ATTEINDRE TOUT CE QUE L'ON PEUT RÉALISER

La biotechnologie permet d'obtenir des résultats qui, il y a seulement deux décennies, relevaient de la science-fiction. Quelques applications étonnantes sont résumées ci-dessous.⁹⁸⁹

- Certaines protéines sont sensibles à la lumière (à certaines longueurs d'onde ; c'est ce qu'on appelle l'optogénétique). Cette capacité peut être exploitée pour allumer ou éteindre des circuits nerveux à volonté en utilisant la lumière. Cette technique a été utilisée pour implanter et activer artificiellement des souvenirs négatifs dans l'esprit d'animaux de laboratoire. Lorsque la lumière est allumée, les rongeurs se comportent

comme s'ils avaient perçu l'expérience négative, puis s'alarment de l'activation, par la lumière, d'une mémoire artificielle implantée dans leur cerveau.

- Il a été possible de créer artificiellement la cellule minimale. Les bactéries possèdent naturellement quelques milliers de gènes. En partant d'une bactérie du genre *Mycoplasma*, tous les gènes considérés comme non essentiels à la vie d'une cellule procaryote ont été désactivés ou éliminés, ce qui a donné naissance à ce qu'on a appelé la cellule minimale (moins de 500 gènes). Une cellule miniaturisée a été conçue, capable d'assurer la viabilité minimale utile pour les applications scientifiques. L'évolution future possible consiste à concevoir des génomes artificiels entièrement nouveaux. Il est devenu possible de créer de nouveaux organismes en remaniant une grande partie des informations nécessaires à la vie : c'est ce qui a été fait avec les micro-organismes.

- De nombreux yaourts et fromages commercialisés, qui sont issus de cultures de micro-organismes, ont été modifiés par la biotechnologie *CRISPR* pour les rendre artificiellement résistants aux virus.¹⁰⁵¹ En quelques années, cette technologie a envahi les laboratoires de l'industrie laitière et des produits fermentés par des microbes. Ainsi, à travers les produits fermentés, le système *CRISPR* a également pénétré dans notre alimentation.

- Des centaines de milliers de personnes dans le monde sont probablement inscrites sur des listes d'attente pour recevoir un organe ou un tissu de donateurs qui pourraient changer leur vie pour le mieux. Il existe des cliniques qui transplantent des cornées ou des valves cardiaques à partir de porcs.¹⁰⁵¹ La possibilité d'utiliser des tissus animaux devient une réalité.

- Les saumons qui ont été génétiquement modifiés pour produire de l'hormone de croissance sont célèbres (ils contiennent un gène supplémentaire contrôlé par un promoteur provenant d'une autre espèce de poisson). L'avantage pour les éleveurs est un taux de croissance plus élevé : presque deux fois plus rapide ; ils mangent plus et grandissent plus vite.¹⁰³³ L'élevage de ces animaux pour la consommation humaine a été autorisé en Amérique du Nord. Nous devons espérer que les mesures de confinement visant à empêcher ces animaux de nager librement dans les océans (en s'accouplant avec des saumons atlantiques sauvages) fonctionneront et qu'aucune erreur ou accident ou événement imprévu ne provoquera la distribution des spécimens dans les mers. Ces mesures de confinement sont une utopie.

- En générant une modification d'un seul nucléotide d'ADN dans le gène qui contrôle la formation des muscles, il a été possible d'avoir un chien beaucoup plus musclé (*CRISPR*).¹⁰²⁹ En utilisant le même principe, des bovins, des porcs, des moutons, des lapins et des chèvres ont été produits avec des tissus musculaires beaucoup plus forts (un seul gène, le gène de la myostatine, a été modifié à l'aide de *CRISPR* pour générer des changements très notables dans les tissus musculaires chez certains animaux).

Les capacités athlétiques d'un être humain sont régies par de nombreux gènes différents, au moins deux cents. On a découvert qu'une mutation qui désactive un gène (le gène de la myostatine) se produit naturellement (mais exceptionnellement) chez certains humains qui se caractérisent par une force hors du commun.¹⁰²⁹ En outre, le gène de la myostatine est impliqué dans des maladies telles que la dystrophie. Par conséquent, ce gène pourrait bientôt devenir la cible de méthodes thérapeutiques biotechnologiques.

D'autres gènes qui pourraient être la cible de stratégies de renforcement sont celui qui génère des os plus solides, celui qui réduit les besoins en sommeil ou celui de l'érythropoïétine^I (utilisé illégalement par certains athlètes pour augmenter les globules rouges et donc la capacité d'oxygénation).¹⁰²⁹ Il pourrait être utile de tracer une ligne de démarcation entre les modifications destinées à sauver des vies et les autres, comme celles qui ont un but esthétique ou qui visent à améliorer les capacités sportives. Malheureusement, il ne sera pas possible d'exclure le tourisme médical vers des cliniques situées dans des paradis pour généticiens qui permettront aux eugénistes d'agir en toute liberté. Contrôler son destin génétique peut être une opportunité mais aussi une réalité terrifiante. Le monde pourrait à l'avenir être divisé en nouvelles catégories de castes, celles issues de l'amélioration et des soins offerts par la biotechnologie et les autres, ce qui ne manque pas de poser des problèmes.¹⁰⁵⁰

Si un jour nous disposons d'un système biotechnologique dont les effets secondaires sont acceptables pour les humains, comment empêcher les gens d'essayer d'améliorer leurs enfants ou même eux-mêmes ?

- Les biotechnologies permettent de produire des chèvres à poils longs (laine) et plus musclées (plus de viande), des chèvres dont le lait produit de la soie d'araignée, des vaches sans cornes (rien qu'aux États-Unis, au moins 13 millions de bovins se font enlever leurs cornes chaque année), des plantes résistantes aux herbicides, etc. Un médicament (ATryn) contenant de l'antithrombine alpha, un anticoagulant naturellement présent dans le corps humain, a été approuvé.¹⁰⁸² Un médicament (ATryn) a été approuvé. Il contient de l'*antithrombine alpha*, un anticoagulant naturellement présent dans le corps humain. Dans les cas où des caillots sanguins se forment spontanément, l'organisme les élimine grâce à l'*antithrombine alpha* avant qu'ils ne deviennent dangereux. Cependant, certaines personnes sont dépourvues du gène responsable de la création de l'*antithrombine alpha* et sont donc susceptibles de souffrir de thrombose, ce qui peut présenter des risques graves lors d'une intervention chirurgicale ou d'un accouchement. L'Union européenne et les États-Unis d'Amérique ont autorisé l'utilisation de ce médicament issu de la technologie transgénique : il provient de chèvres transgéniques qui le produisent dans leur lait et sera utilisé pour traiter les personnes dépourvues du gène nécessaire à l'élimination des caillots sanguins.^{1034, 1035}

- Un médicament est produit dans le lait de lapins génétiquement modifiés : il s'agit d'un inhibiteur d'estérase.¹⁰³⁶ Il est utilisé pour traiter l'angioedème, une maladie héréditaire autosomique dominante rare caractérisée par un gonflement (œdème) de la peau, des muqueuses et des organes internes, qui peut parfois être fatal.¹⁰³⁷

- Un autre médicament est extrait d'œufs de poules transgéniques : ils contiennent une protéine qui fonctionne comme une enzyme chez l'homme.¹⁰³⁹ Cette protéine

^I L'érythropoïétine (Epo) est une hormone synthétisée par le rein et, dans une moindre mesure, par le foie et le cerveau, dont la fonction principale est de réguler la production de globules rouges. Sa découverte à la fin des années 1970 a été suivie par le développement, grâce à la biotechnologie, de différents types d'érythropoïétine humaine recombinante (rEpo), qui sont utilisés pour traiter diverses maladies. L'érythropoïétine recombinante, en raison de sa capacité à améliorer l'oxygénation des tissus (tels que les tissus musculaires), est utilisée à mauvais escient par les athlètes, notamment dans les sports d'endurance. Les athlètes concourant sur de longues distances en athlétisme ou dans des sports d'endurance, comme le cyclisme et le ski de fond, peuvent utiliser illégalement diverses méthodes pour augmenter l'oxygénation des tissus afin d'améliorer leurs performances sportives. Il s'agit notamment de l'autotransfusion et de l'administration sous-cutanée ou intraveineuse d'érythropoïétine recombinante.

1047, 1048

(médicament) est utilisée pour traiter une maladie héréditaire rare qui altère la capacité à métaboliser les graisses (en raison d'un déficit en enzymes appelées lipases).¹⁰³⁸

- Quelques dizaines de médicaments (par exemple l'insuline et l'hormone de croissance humaine) sont produits par des organismes génétiquement modifiés, principalement par des micro-organismes (bactéries).

- Il existe au moins 30.000 souches de souris qui ont été créées avec les caractéristiques génétiques permettant de répondre à des objectifs scientifiques, tels que l'étude du cancer ou des maladies respiratoires. Les applications possibles sont désormais nombreuses, et si certaines ont des objectifs nobles, d'autres soulèvent un certain nombre de préoccupations.

- Les plantes sont également modifiées pour produire des médicaments utiles à l'homme, par exemple en introduisant des gènes étrangers à l'aide de bactéries (*Agrobacterium*), de virus (par exemple le virus de la mosaïque du tabac) ou de systèmes mécaniques (micro-balles en tungstène ou en or recouvertes du matériel génétique à transférer). On espère obtenir des vaccins à partir des plantes (par exemple, le vaccin contre l'hépatite B à partir de plants de tabac) ou des médicaments contre le cancer (également à partir de plants de tabac).¹⁰⁴⁰

- On a créé des champignons comestibles qui peuvent être conservés plus longtemps en désactivant le gène responsable du noircissement. Cette modification n'implique pas l'insertion de caractéristiques génétiques étrangères mais la désactivation d'un gène présent naturellement.

- Un autre exemple est le maïs, qui contient de l'amidon composé uniquement d'amylopectine : le gène qui produit l'autre composant de l'amidon, l'amylose, a été désactivé.⁹⁸⁹

Nous devons nous demander jusqu'où nous pouvons aller.^{1041, 1042, 1043} Intervenir dans l'évolution de notre propre espèce et de beaucoup d'autres, c'est jouer avec la nature. Est-il permis de créer et d'élever un zoo artificiel à partir de dizaines de milliers d'expériences différentes ? Tout ce qui peut être fait n'a pas besoin d'être fait.

Il convient de réfléchir à l'opportunité de commercialiser des animaux de compagnie génétiquement modifiés. Des micro-cochons, de la taille d'un chat, ont été créés dans l'idée de les commercialiser comme animaux de compagnie (grâce à une biotechnologie appelée TALEN ou *transcription activator-like effector nucleases*, l'hormone de croissance a été désactivée).^{1030, 1031} Plusieurs poissons luminescents appelés *GloFish* ont été créés : *Danio rerio*, *Gymnocorymbus ternetzi*, *Puntigrus tetrazona*, *Epalzeorhynchus frenatus*, *Brycinus longipinnis*, *Betta splendens*, *Gyrinocheilus aymonieri*.^{1009, 1010, 1011} Les poissons apparaissent brillants sous la lumière blanche normale de l'aquarium et fluorescents sous la lumière bleue. Il s'agit de poissons génétiquement modifiés dans le but d'être commercialisés pour le marché de l'aquariophilie. On peut les qualifier superficiellement de "poissons d'ornement". Les gènes responsables de la fluorescence peuvent avoir différentes origines : de la méduse *Aequorea victoria* ; du poulpe colonial *Renilla reniformis* ; des coraux *Discosoma*, *Montipora efflorescens*, *Scleractinia* spp, *Pectiniidae* spp, *Lobophyllia hemprichii* et *Dendronephthya* spp ; de l'anémone *Anemonia sulcata*. En 2003, Taiwan est devenu le premier État au monde à autoriser la vente d'un organisme génétiquement modifié comme animal de compagnie. Plus de

100.000 *GloFish* auraient été vendus pour quelques dollars chacun en moins d'un mois.¹⁰¹¹ C'est une expérience inutile et dangereuse. Personne ne peut prévoir les désastres engendrés par ces caprices, qui témoignent d'une superficialité et d'un analphabétisme écologique. Tout comme la sélection naturelle n'entraîne pas toutes les variations possibles dans le processus d'évolution, nous devrions également apprendre à limiter notre capacité à jouer avec l'évolution en évitant la sélection artificielle, du moins dans les cas où elle ne répond pas à l'exigence d'être utile et nécessaire à la communauté dans son ensemble, comme c'est le cas pour le *GloFish*.

Il faut espérer que les milliers d'organismes artificiels, tous issus de l'ingéniosité humaine, resteront à jamais confinés dans des fermes. Cela est difficile à réaliser chez les animaux (pensons aux bactéries ou aux insectes) et beaucoup plus difficile dans le cas des plantes : comment confiner le pollen ? Comment contrôler la propagation des animaux transgéniques commercialisés comme animaux de compagnie ou pour les aquariums ? Plus improbable encore est la certitude que les micro-organismes élevés, conservés et manipulés ne quitteront pas les centres de recherche. Les bactéries peuvent échanger des informations, même entre celles que nous avons classées comme des espèces différentes, et celles élevées en laboratoire peuvent rencontrer celles qui se trouvent dans le corps des chercheurs et d'autres êtres vivants. Les virus peuvent également transporter l'information génétique dans les cellules procaryotes, comme celles des bactéries, et eucaryotes, comme celles des animaux et des plantes, ou l'échanger entre eux. Il est donc difficile, voire impossible, de confiner et de gérer l'invisible (les virus peuvent avoir une taille de cent millièmes de millimètre). L'écosystème du laboratoire est totalement artificiel et il est présomptueux et superficiel de croire que nous maîtrisons la situation.

La biotechnologie offre continuellement de nouvelles possibilités, moins coûteuses et plus faciles à utiliser.¹⁰⁴⁵ En même temps, elles permettent de concevoir des stratégies considérées comme tout aussi dangereuses que les armes nucléaires et chimiques, telles que les applications possibles en matière d'agro-terrorisme ou celles visant à endommager les écosystèmes et la biodiversité. La biotechnologie a donc deux visages, le positif et le négatif.¹¹⁵³ Malheureusement, il est devenu possible, de manière réaliste, de créer des micro-organismes ou d'autres organismes nuisibles aux humains et/ou à d'autres êtres vivants. Les agences militaires classent certaines méthodes offertes par la biotechnologie comme d'autres armes de destruction massive.^{1029, 1051}

Au cours des siècles, l'utilisation de maladies infectieuses pour vaincre ses ennemis était une pratique répandue chez de nombreux peuples. Au Moyen Âge, par exemple, les cadavres des victimes de la peste étaient catapultés dans les murs de l'ennemi, les Américains utilisaient des couvertures infectées par la variole pour les distribuer aux Peaux-Rouges, et en Nouvelle-Zélande, des prostituées infectées par la syphilis étaient envoyées pour nuire aux Maoris. Le peuple hittite utilisait comme arme "bactériologique" des moutons infectés par la tularémie, une infection grave causée par la bactérie *Francisella tularensis*, qui, si elle n'est pas traitée à temps, peut entraîner la mort, encore aujourd'hui. Cette terrible maladie a été signalée pour la première fois au Moyen-Orient en 1335 avant Jésus-Christ dans une ville saccagée par les Hittites. Sans le savoir, les Hittites ont emporté certains des animaux malades avec eux et ont infecté le reste du bétail, propageant l'infection et créant la "peste hittite". Les premiers bioterroristes de l'histoire ont peut-être été (sans le savoir) les Hittites, il y a plus de 3.300 ans.^{1053, 1054, 1055}

Dans le passé, lorsque la microbiologie n'était pas encore une science, on utilisait des flèches dont les pointes étaient contaminées en les souillant dans des cadavres en décomposition (c'est probablement ainsi qu'elles propageaient des micro-organismes tels que *Clostridium perfringens* et *Clostridium tetani*). Plus récemment, certaines utilisations d'armes biologiques dans la guerre, contre des animaux et des humains, ont été enregistrées : les Japonais les ont utilisées entre 1932 et 1945.¹⁰⁵³

Parmi les terribles maladies répertoriées comme potentiellement efficaces dans la guerre figurent les micro-organismes de la variole, de l'anthrax, de la peste et de la tularémie. Malheureusement, il est également possible de penser à des stratégies de destruction des plantes ou des animaux d'élevage. Il y a probablement de nombreux pays qui mènent des recherches et des programmes pour l'infraction, ainsi que pour la défense contre d'éventuelles attaques avec des armes biologiques. La production d'armes d'origine biologique est beaucoup moins coûteuse que les autres types d'armes, et l'ennemi peut facilement rester en liberté.¹¹⁵²

Un autre aspect intéressant mais inquiétant est que les caractéristiques génétiques de dizaines de milliers de micro-organismes sont connues : par exemple, les séquences génétiques de milliers de virus de la grippe sont connues. Les séquences génétiques, c'est-à-dire les caractéristiques héréditaires qui confèrent la pathogénicité et l'infectivité à un nombre infini d'agents pathogènes, sont connues et publiques. Ces connaissances permettent de concevoir et de créer en laboratoire des microbes présentant les caractéristiques souhaitées (par exemple, des microbes génétiquement modifiés présentant des caractéristiques hybrides de différents agents pathogènes tels que le virus VIH et l'agent de la malaria). L'innovation scientifique permet des applications potentiellement bénéfiques mais, en même temps, elle ouvre aussi la porte à des projets effrayants qui deviennent facilement réalisables parce qu'ils ne sont pas coûteux et font appel à des technologies accessibles. Les applications nuisibles, ou militaires, de la biotechnologie sont facilement imaginables et à la portée de nombreux laboratoires, elles sont donc incontrôlables et utilisables sans une déclaration claire d'hostilité.^{1152, 1053} Il s'agit de stratégies qui peuvent être conçues pour créer beaucoup de dégâts parmi les êtres vivants de manière anonyme, même par de petits groupes de personnes. L'innovation a conduit à une accélération considérable de la simplification de l'utilisation de la biotechnologie, de son rapport coût-efficacité, et donc à une augmentation considérable des utilisateurs potentiels. En conséquence, les préoccupations en matière de sécurité et de paix ont augmenté.

Pour qu'une arme biologique soit efficace contre l'homme, elle doit présenter plusieurs caractéristiques :

- Être facilement et rapidement transmissible.
- Générer un taux de mortalité élevé et affaiblir le système de santé.
- Générer la panique et par conséquent affaiblir la sécurité sociale.
- Nécessitent des systèmes de prévention et de contrôle coûteux et compliqués.
- Ne pas laisser de traces facilement identifiables de son origine.
- Mettre en place des systèmes de limitation des dommages pour la fraction non ciblée de la population. Un système de délinquance efficace doit au moins protéger ceux qui le produisent, et pour y parvenir, il existe diverses possibilités telles que la vaccination, l'utilisation d'anticorps ou de médicaments (à moins que les conceptions impliquent le suicide des responsables). Le génie génétique permet de concevoir des agents pathogènes qui ciblent spécifiquement des cellules particulières (par exemple, ceux qui contiennent une protéine de surface permettant l'entrée). Il pourrait donc être possible de créer des systèmes biologiques qui ciblent les caractéristiques génétiques les plus répandues dans une zone géographique ou un âge donné.

Il est intéressant de remarquer que certains micro-organismes tels que les agents de la variole, de la tuberculose, de la peste, de la grippe espagnole, de la poliomyélite, d'Ebola, la bactérie du charbon et le coronavirus (Covid 19 également connu sous le nom de *SARS-CoV-2* ou *coronavirus du syndrome respiratoire aigu sévère*) possèdent, à des degrés divers, certaines des caractéristiques qui viennent d'être énumérées.¹⁰⁵³ En 2001, aux États-Unis, la bactérie anthrax a été utilisée dans des attaques terroristes qui ont tué cinq personnes et en ont empoisonné 17 : des spores d'anthrax ont été livrées à des bureaux de journaux et à deux sénateurs dans une série de colis.

La manipulation de micro-organismes en laboratoire, même si elle est effectuée exclusivement à des fins utiles telles que la compréhension et la guérison de maladies, comporte des risques considérables. La conférence d'Asilomar sur l'ADN recombinant a eu lieu en Californie en 1975. L'objectif principal de la conférence était d'aborder les risques biologiques découlant des manipulations génétiques. Pour la première fois, les risques ont été reconnus et des mesures de précaution ont été proposées. L'écosystème artificiel des laboratoires peut favoriser les contacts entre différents micro-organismes pathogènes, entre les micro-organismes et les humains, entre les animaux élevés en laboratoire et les animaux sauvages du milieu environnant. Différents microbes peuvent naturellement échanger des informations et en générer d'autres qui peuvent être plus dangereuses. Les activités humaines favorisent des processus qui se produisent naturellement, mais qui sont accélérés et plus nuisibles en raison de la surpopulation et de l'incapacité à maintenir des barrières physiques et biologiques (différents virus se recombinent facilement, c'est-à-dire qu'ils peuvent échanger des informations génétiques entre eux et avec la cellule hôte, lorsqu'ils se trouvent dans le même organisme au même moment). Ces conditions sont souvent présentes dans de nombreux environnements urbains où la surpopulation, l'hygiène insuffisante, la dégradation des milieux naturels et la présence simultanée d'espèces sauvages et d'élevage contribuent à déclencher et à favoriser des processus négatifs pour la santé humaine et celle des autres êtres vivants. Ces processus sont naturels et prévisibles, et sont facilités par des conditions artificielles. Les épidémies sont souvent la conséquence d'interactions complexes entre l'homme et d'autres espèces animales, y compris les micro-organismes pathogènes. Les écosystèmes modifiés peuvent favoriser l'émergence de nouveaux agents pathogènes et la propagation d'épidémies. Plus de 330 maladies infectieuses dangereuses ont été enregistrées depuis 1940 et la tendance semble être à la hausse, en partie à cause de la déforestation et de diverses pressions anthropiques.¹¹⁹⁰ Il faut également tenir compte du fait que la colonisation et la dégradation des zones reculées augmentent les possibilités de contact avec des animaux sauvages qui sont des vecteurs potentiels de maladies.¹²⁷⁶ En outre, nous transportons volontairement et involontairement des êtres vivants et leurs maladies sur toute la planète, favorisant un taux de propagation sans précédent dans l'histoire de l'humanité.

Les effets générés par la réduction de la biodiversité seront dévastateurs, mais on en ignore largement les détails et la vitesse. Certains types d'épidémies sont susceptibles de se propager plus facilement dans un environnement dégradé, simplifié et artificiel.¹²⁷⁶ Certaines infections peuvent devenir plus dangereuses (par exemple, l'*hantavirus*).¹¹⁷⁷ L'augmentation de la biodiversité réduit la possibilité de propagation des maladies entre les animaux d'une même espèce. Des institutions, telles que celles de la Communauté économique européenne, reconnaissent également l'importance de la biodiversité dans la réduction des maladies infectieuses :¹¹⁸²

"... La nature est importante non seulement pour notre bien-être physique et mental, mais aussi pour la capacité de notre société à faire face aux changements mondiaux, aux menaces sanitaires et aux catastrophes. La nature nous est indispensable. ...Pour être saine et résiliente, une société doit donner à la nature l'espace dont elle a besoin. La récente pandémie de Covid-19 nous enseigne combien il est urgent d'agir pour protéger et restaurer la nature : elle nous fait prendre conscience des liens entre notre santé et celle des écosystèmes, et démontre la nécessité d'adopter des chaînes d'approvisionnement et des modes de consommation durables qui ne repoussent pas les limites de la planète. Tous ces aspects soulignent que le risque d'apparition et de propagation des maladies infectieuses augmente à mesure que la nature est détruite. Pour renforcer notre résilience et prévenir les épidémies et la propagation des maladies à l'avenir, il est donc crucial de protéger et de restaurer la biodiversité et les écosystèmes qui fonctionnent bien".

ABEILLES DOMESTIQUES GÉNÉTIQUEMENT MODIFIÉES

Chez l'abeille domestique, il sera probablement bientôt possible d'induire artificiellement des comportements particuliers utiles à l'apiculteur. On pourrait espérer améliorer le comportement que certaines abeilles possèdent naturellement dans la nature, à savoir celui de se nettoyer mutuellement en éliminant les parasites tels que les acariens, ou celui d'éliminer les larves malades. Les abeilles génétiquement modifiées pourraient être plus résistantes à des parasites redoutables tels que l'acarien *Varroa*.

On a découvert que les scalpels moléculaires conçus par la nature pour défendre les bactéries contre les virus, leurs ennemis naturels, pouvaient être utilisés en laboratoire pour modifier l'expression génétique de nombreux êtres vivants. Le système *CRISPR* a été utilisé pour étudier la fonction des gènes en observant ce qui se passe lorsqu'on les désactive chez la drosophile (*Drosophila melanogaster*) et le ver à soie (le papillon *Bombyx mori*), en 2013 (il s'agit probablement des premières applications publiées pour les arthropodes).^{1112, 1126} Le scalpel moléculaire *CRISPR* a ensuite été utilisé pour désactiver sélectivement certains gènes chez d'autres insectes tels que les moustiques, les abeilles et les papillons, mais il s'est avéré moins efficace que chez les mammifères. La désactivation est obtenue en générant des délétions ou des insertions dans les séquences du gène cible. L'injection du système *CRISPR/Cas 9* dans des œufs de reine d'abeille fraîchement pondus a bloqué artificiellement l'expression des gènes (œufs pondus depuis moins de deux heures).¹¹¹² La micro-injection précoce du scalpel moléculaire dans l'œuf fraîchement pondu réduit le risque de mosaïcisme et augmente l'efficacité. En insérant le guide approprié (un ARN conçu en laboratoire) dans le système *CRISPR*, il a été possible de générer le blocage de l'activité génétique dans les deux allèles cibles chez les embryons d'*Apis mellifera* ; la désactivation des gènes souhaités (*mutant knockout*) a été obtenue avec une grande efficacité. Une fraction présentait le phénomène de mosaïcisme, c'est-à-dire que seules certaines parties du corps de l'embryon avaient désactivé le gène comme souhaité ; une chimère était générée : dans certaines cellules, les gènes cibles étaient désactivés et dans d'autres non.¹¹¹² Le mosaïcisme peut être dû à l'entrée retardée du système *CRISPR* injecté dans les œufs. Ces résultats confirment que le système *CRISPR* permet de désactiver sélectivement des gènes et de créer des abeilles transgéniques homozygotes.

Chez les abeilles (*Apis mellifera*), un certain nombre de gènes codant pour la production de protéines présentes dans la gelée royale sont importants pour la différenciation des larves en reines (ces protéines sont produites par la glande hypopharyngienne et on a également constaté qu'elles étaient présentes dans le cerveau, elles ont donc sans doute d'autres fonctions).^{1116, 1117} En utilisant le système *CRISPR/Cas9*, il a été possible d'inactiver (*knockout*) l'un de ces gènes (*protéine majeure de la gelée royale 1*) et d'obtenir des reines qui transmettent cette caractéristique génotypique à leurs faux-bourçons, chez qui l'absence de production de cette protéine ne semble pas générer de problèmes (du moins dans les premiers stades du développement).¹¹¹⁵ Dans cette expérience également, le *kit* biotechnologique composé de protéines et d'ARN (le système *CRISPR/Cas9*) a été injecté dans des œufs pondus dans les trois heures et un mosaïcisme a été observé. La reine des abeilles, dans des conditions artificielles, est incitée à pondre des œufs non fécondés qui donneront naissance à des mâles. L'examen du génotype des mâles a confirmé la transmission héréditaire de la modification génétique induite artificiellement : la désactivation de la production d'une protéine sécrétée par les abeilles ouvrières pour former la gelée royale (la désactivation a été réalisée par des délétions et des insertions à l'aide du système *CRISPR/Cas9*). L'insémination artificielle entre des mâles issus du laboratoire et des reines non modifiées, une technique largement utilisée en apiculture depuis des années, a également permis d'obtenir des abeilles ouvrières génétiquement modifiées

(hétérozygotes). Un deuxième croisement entre les reines (hétérozygotes) du premier croisement (vareuse mutante et reine sauvage) produit des abeilles ouvrières et des reines homozygotes. Cela permet de fixer la mutation induite artificiellement de manière à ce qu'elle soit également transmise aux insectes qui produisent normalement cette protéine (abeilles ouvrières à un certain stade de leur vie). Grâce à cette technique, il est possible d'étudier les effets sur la santé et le comportement de la colonie résultant de la désactivation d'un seul gène.

Des abeilles ont déjà été produites à l'aide de *CRISPR/Cas9* dans lesquelles un gène produisant une protéine présente dans le système nerveux central (*mKast* ou *middle-type Kenyon cell-preferential arrestin-related protein*) a été désactivé.¹¹¹⁸ En désactivant des gènes individuels, dont l'altération n'entraîne pas de problèmes de reproduction évidents, on peut espérer comprendre les fonctions assurées par une protéine dans le comportement ou les capacités sensorielles des insectes.

Les transposons sont définis comme des éléments génétiques dans les génomes des procaryotes et des eucaryotes qui peuvent se déplacer d'une position dans le génome à une autre. En particulier, chez les procaryotes, ils peuvent se déplacer vers de nouvelles positions sur le même chromosome (car il est unique, ou sur des plasmides), tandis que chez les eucaryotes, ils peuvent se déplacer vers des positions différentes sur le même chromosome ou sur des chromosomes différents. La transposition peut entraîner l'inactivation fonctionnelle d'un gène si le transposon s'insère dans le gène, ou une modification des niveaux d'expression du gène si le transposon s'insère dans le promoteur du gène.¹¹¹⁴ Des fonctions spécifiques telles que de nouveaux gènes peuvent être ajoutées aux séquences de transposons. Ces morceaux d'ADN peuvent également être utilisés pour transporter des gènes et donc de nouvelles fonctions. Chez les bactéries, les transposons peuvent porter des gènes de résistance aux antibiotiques. La structure des transposons chez les eucaryotes est très similaire à celle des procaryotes. Ils possèdent des gènes qui codent pour les protéines nécessaires à la transposition (coupure et insertion) et qui leur permettent de s'excréter et de se réintégrer à différents endroits du génome.¹¹¹³ Comme une activité de transposition trop importante peut détruire le génome, de nombreux organismes ont développé divers mécanismes pour réduire la transposition à des niveaux acceptables.

Les transposons peuvent être insérés en inhibant l'expression du gène sur un allèle (hétérozygotie) ou sur les deux (homozygotie). Dans ce dernier cas, l'inhibition, par exemple de la synthèse d'une protéine, sera plus importante (en utilisant les transposons, on peut espérer obtenir la désactivation complète d'un gène).

En 2014, grâce à la technique des transposons, il a été possible de créer des abeilles transgéniques (des molécules d'ADN, c'est-à-dire des plasmides et des transposons, sont injectées dans les œufs).¹¹¹³ Il est techniquement possible d'intégrer des séquences stables, c'est-à-dire héréditaires, ayant des fonctions régulatrices (séquences d'ADN ayant des fonctions de promoteur ou d'inhibiteur de gènes spécifiques). Il est donc possible de manipuler artificiellement l'expression des gènes pour étudier leurs effets (phénotypes). Dans cette recherche, 25% des embryons qui ont subi une micro-injection (après avoir été placés dans des cellules de reines) ont été acceptés par la colonie. La progéniture des reines abeilles a montré la modification génétique générée par l'utilisation de la technique du transposon. L'héritabilité et l'acceptabilité par la colonie sont ainsi confirmées, malgré les manipulations. Chez chaque reine des abeilles, les transposons se sont intégrés à différents endroits sur différents chromosomes. Un autre aspect important est que les résultats souhaités sont obtenus avec une faible efficacité, il est donc nécessaire de micro-injecter les molécules d'ADN synthétisées en laboratoire dans un grand nombre d'embryons.¹¹¹³

L'un des pires ennemis des apiculteurs et des abeilles est un petit acarien : le *Varroa*. En appliquant le génie génétique à une bactérie qui vit dans le tube digestif des abeilles, il a été possible (en laboratoire) de combattre l'acarien et un virus qu'il peut transmettre.¹¹³³ La bactérie

de l'abeille (*Snodgrassella alvi*) a été modifiée pour tuer le parasite. ¹¹³⁴ En utilisant une technologie inspirée d'un mécanisme naturel de protection des eucaryotes contre les virus, il a été possible d'induire une modification de la bactérie qui était létale pour l'acarien. En particulier, les doubles hélices d'ARN favorisent la dégradation des séquences homologues d'ARN messager (par exemple, les séquences virales). Ces outils moléculaires (ARN à double hélice) peuvent être fournis artificiellement à l'insecte par injection ou par alimentation. En créant la séquence d'acide ribonucléique appropriée, il a été possible de modifier l'expression des gènes chez les abeilles et de contrer le virus qui provoque des déformations des ailes. L'administration de cet acide ribonucléique aux abeilles n'est pas facile et peut avoir des effets secondaires (par exemple sur des sites non ciblés). Afin de surmonter cet obstacle, une bactérie qui vit normalement en symbiose avec les abeilles (*Apis mellifera*) a été génétiquement modifiée. La bactérie (*Snodgrassella alvi* wkB2) introduite dans le tube digestif se multiplie et reste à l'intérieur du corps des abeilles. ¹¹³⁴ Elle peut alors produire des acides ribonucléiques capables d'immuniser les abeilles et potentiellement être transmis au sein de la colonie sans intervention extérieure. Cette stratégie a le potentiel de générer une immunité de longue durée et de se propager de manière autonome parmi les abeilles. Les acides nucléiques responsables de l'action protectrice se trouvent dans différentes parties du corps de l'insecte, comme l'hémolymph où la bactérie ne réside pas, de sorte qu'ils sont efficacement disséminés. Les acides ribonucléiques produits dans les bactéries génétiquement modifiées ont la capacité d'inhiber (réduire au silence) la production de protéines essentielles à la vie des parasites : l'acarien ou le virus. Avec cette stratégie, on peut espérer inhiber artificiellement l'expression d'un ou plusieurs gènes à la fois chez l'abeille et chez ses parasites en modifiant une bactérie symbiotique. En agissant sur le microbiome d'un être vivant, y compris l'homme, on peut espérer guérir ou améliorer la capacité à combattre certaines maladies. Cette approche est fascinante et étonnante, mais en même temps elle rend possible des applications qui peuvent être nuisibles ou qui peuvent réserver des surprises.

Les chercheurs disposent de nouvelles techniques pour améliorer la connaissance des fonctions des gènes chez l'abeille domestique également : les gènes et les fonctions individuelles peuvent être désactivés à volonté. Un problème pourrait être généré par le comportement social des abeilles, car les embryons obtenus par cette procédure artificielle pourraient être éliminés de la colonie car ils présentent de nombreuses traces chimiques et physiques non naturelles. Cette recherche présente des résultats préliminaires et prometteurs, mais à l'avenir, en particulier pour les animaux sociaux comme les abeilles, il pourrait y avoir de nombreux obstacles qui ne sont pas prévus aujourd'hui. Les abeilles génétiquement modifiées doivent être maintenues dans des conditions telles qu'elles ne puissent pas quitter le laboratoire. Comment est-il possible d'étudier les interactions entre les gènes, l'environnement et le comportement sans quitter le laboratoire ? Ce type d'expérimentation présente de nombreux risques inconnus, et si les insectes modifiés devaient quitter le laboratoire, un problème écologique de dimensions inconnues pourrait être généré, mais il faut l'éviter.

LES MOUSTIQUES ONT INFLUENCÉ LE DESTIN DE L'HUMANITÉ

Les plus de 3.500 espèces de moustiques ont, au fil des millénaires, influencé le destin de l'homme et d'autres espèces : elles existent depuis 190 millions d'années ; l'un des plus anciens moustiques fossiles a été trouvé dans de l'ambre au Canada et date d'environ 105 millions d'années. L'une des plus anciennes mentions historiques d'une maladie transmise par les moustiques a été identifiée dans des tablettes sumériennes datant de 3200 avant Jésus-Christ (entre le Tigre et l'Euphrate). Des traces de malaria ont été trouvées dans des squelettes datant de 9000 ans en Turquie et de 5200 ans en Égypte (Hérodote rapporte qu'en Égypte, les gens essayaient de soulager les symptômes de la malaria en se baignant dans l'urine).¹²⁸³

Confirmant la façon dont le sort des moustiques a été lié aux habitudes humaines et vice versa, en 400 avant J.-C., le Japon a importé de Chine la culture du riz avec la malaria et cette maladie a contribué à défendre Rome contre Hannibal vers 200 avant J.-C.. Le nom de paludisme vient de "mauvais air", c'est-à-dire d'une infection due à l'eau stagnante. Galien, au II^e siècle de notre ère, rapporte qu'à Rome, pour guérir la malaria (et pas seulement), on pratiquait des saignées et on portait des objets (par exemple des amulettes) portant l'inscription magique "abracadabra".

Les moustiques femelles utilisent leurs pièces buccales urticantes et suceuses pour aspirer quelques milligrammes de sang, en injectant un anticoagulant : elles préfèrent piquer les individus du groupe sanguin 0 et les femmes enceintes ; elles sont capables de piquer plusieurs fois des animaux d'espèces différentes, mais il n'y a pas d'échange de sang, elles ne peuvent donc pas transmettre le VIH. Les mâles peuvent se nourrir de nectar, s'accoupler plusieurs fois et former des essaims (jusqu'à 300 mètres de haut) pour attirer les femelles. Les femelles pondent toujours leurs œufs dans l'eau, vivent quelques semaines et, exceptionnellement, jusqu'à cinq mois, et se déplacent rarement à plus de 400 m de leur lieu de naissance (certains moustiques, comme ceux du genre *Aedes*, peuvent pondre leurs œufs dans la boue et sont capables de résister à la dessiccation pendant des années).

Différentes espèces de moustiques sont capables de propager des maladies telles que le paludisme (5 types différents causés par des protozoaires), la fièvre du Nil, le virus Zika (qui peut également être transmis par voie sexuelle), la fièvre jaune, la filariose (un ver qui provoque une maladie appelée éléphantiasis) et la dengue (ces insectes propagent également des maladies chez d'autres animaux, par exemple, au moins 29 formes de paludisme sont connues chez les reptiles).

La plupart des maladies humaines causées par des organismes sont zoonotiques, c'est-à-dire qu'elles touchent également les animaux : le rhume provient des chevaux ; la grippe aviaire, l'herpès et la varicelle proviennent des poulets ; le bétail a transmis la variole, la tuberculose et la rougeole. Les moustiques, en raison des maladies graves qu'ils peuvent transmettre, pourraient avoir été responsables de la mort de près de la moitié des humains ayant vécu sur la planète : plus de 52 milliards de personnes au cours des 200.000 dernières années. Aujourd'hui encore, les 15 principales maladies transmises à l'homme par ces insectes sont responsables de plus de 800.000 décès par an.¹²⁸³

La fièvre jaune (causée par un virus) est la seule maladie pour laquelle il existe un vaccin efficace depuis plus de 70 ans, bien qu'elle continue à causer jusqu'à 50.000 décès par an, principalement en Afrique. Il existe des traitements efficaces contre la filariose, mais elle continue de faire souffrir au moins 120 millions de personnes par an, principalement en Afrique et en Asie du Sud-Est.¹²⁸³ La dengue touche probablement 400 millions de personnes chaque année.

Chaque année, au moins 300 millions de personnes contractent le paludisme par la piqûre de moustiques *anophèles*. La gravité de la maladie dépend de nombreux facteurs tels que la souche de paludisme contractée ; il est possible d'être infecté par plusieurs souches en même temps.

Les cinq types de paludisme humain sont transmis par environ 70 des 480 espèces connues d'*anophèles* (les protozoaires se nichent dans le foie humain et attaquent les globules rouges en se nourrissant d'hémoglobine ; la fièvre peut dépasser 41°C). *Plasmodium falciparum* est le parasite le plus mortel ; *Plasmodium vivax* a un taux de mortalité très faible, inférieur à 5% en Afrique et à 2% dans le reste du monde. Certains parasites, comme *Plasmodium vivax*, restent dans le foie et peuvent provoquer des rechutes après plusieurs années.

Le plasmodium s'accouple dans le moustique, passe du tube digestif aux glandes salivaires et, une fois à l'intérieur du corps, il est capable d'induire la production d'une odeur qui attirera les moustiques femelles, de manière à favoriser la poursuite du cycle de vie. Lorsqu'il se trouve dans les glandes salivaires du moustique, le parasite l'incite à piquer plus souvent en inhibant la production de l'anticoagulant : la quantité de sang collectée à chaque piqûre sera moindre et, par conséquent, il piquera plus souvent pour obtenir la quantité nécessaire au développement des œufs (jusqu'à trois fois le poids du corps). *Le Plasmodium falciparum* peut entraîner un taux de mortalité compris entre 25 et 50%, et plus de 75% des décès concernent des enfants africains de moins de 5 ans. Cette maladie interagit avec d'autres qui sont particulièrement répandues en Afrique ; par exemple, le paludisme augmente la probabilité de développer le VIH et ce dernier, en affaiblissant les défenses immunitaires, rend plus grave la maladie générée par le *Plasmodium*. Ces deux maladies se favorisent mutuellement et sont répandues dans certaines des régions les plus pauvres du monde, où les gens gagnent moins d'un dollar par jour. En Afrique et en Asie, la majorité des malades n'ont pas les moyens d'acheter des médicaments.

L'un des moyens de défense contre le paludisme mis au point par la sélection naturelle est la drépanocytose : les enfants qui héritent d'un seul gène d'hémoglobine modifié sont immunisés à 90% contre le *Plasmodium falciparum* (ce sont les hétérozygotes). On estime qu'au moins 60 millions de personnes sont porteuses de ce trait génétique, qui est apparu comme une contre-mesure à la longue lutte pour la survie contre les moustiques en Afrique. Au moins 10% de la population mondiale possède des caractéristiques génétiques qui lui confèrent une résistance aux deux principaux types de paludisme : *Plasmodium falciparum* et *Plasmodium vivax*. Plus de 95% des habitants de certaines régions d'Afrique sont "Duffy négatifs", c'est-à-dire qu'ils possèdent des protéines à l'extérieur des globules rouges qui ne permettent pas au parasite de pénétrer, de sorte qu'ils ne contractent pas la maladie. Trois pour cent de la population mondiale sont porteurs des caractéristiques génétiques de la thalassémie qui réduisent considérablement la probabilité de contracter le *Plasmodium vivax*.

L'un des plus anciens remèdes naturels utilisés dans la lutte contre les moustiques est le chrysanthème : les fleurs séchées étaient utilisées comme insecticides, car elles contiennent des pyréthroïdes naturels, déjà en 1000 avant J.-C. en Chine et, aujourd'hui encore, les chimpanzés mâchent les feuilles d'une plante (*Vernonia amygdalina*), qui est utilisée dans la cuisine traditionnelle de certaines régions d'Afrique pour traiter la malaria.¹²⁸³ C'est peut-être aussi pour cette raison que, dans les pays où les maladies transmises par les moustiques ont historiquement été importantes, les chrysanthèmes sont associés aux cérémonies funéraires. Une autre plante aux propriétés antipaludiques remarquables, décrite dans un texte médical chinois vieux de 2200 ans (intitulé : *52 recettes*), est l'armoise chinoise (*Artemisia annua*). Un important médicament antipaludéen a été extrait du quinquina (*Chincona*) et utilisé par les populations indigènes du Pérou.

L'Agro Pontino, dans le Latium, est infesté de moustiques et de malaria depuis des milliers d'années. Jules César et Napoléon Bonaparte avaient déjà envisagé des plans de récupération des terres. Bien plus tard, Benito Mussolini est parvenu à mettre en œuvre cet ambitieux projet, au prix de sacrifices considérables, avant la Seconde Guerre mondiale. Dans

les années 1920, au moins huit cents millions de personnes dans le monde étaient touchées par le paludisme, avec un taux de mortalité d'environ quatre millions par an. Au cours des mêmes années (1918-1919), la grippe espagnole a infecté au moins 500 millions de personnes, tuant entre 75 et 100 millions d'entre elles, ce qui est beaucoup plus que les personnes décédées à la suite de la Première Guerre mondiale : entre 1914 et 1918, 65 millions de personnes ont combattu, 10 millions ont été tuées et 25 millions blessées.¹²⁸³

En 1923, la malaria a touché 18 millions de personnes dans l'ancienne Union soviétique et en a tué 600.000, tandis que le typhus, transmis par les puces, a touché 30 millions de personnes et causé 3 millions de décès entre 1920 et 1922.

En 1923, un insecticide à base d'acide cyanhydrique a été conçu en Allemagne pour être utilisé contre les moustiques (le Zyklon, qui signifie cyclone en allemand, a été synthétisé par le chimiste juif Haber, qui a remporté le prix Nobel mais a été contraint d'émigrer : le Zyklon est malheureusement tristement célèbre pour avoir été utilisé dans les chambres à gaz des camps d'extermination tels qu'Auschwitz). Le DDT a été synthétisé en 1874 mais ses propriétés en tant qu'insecticide ont été découvertes en 1939 (Müller, le découvreur, a reçu le prix Nobel en 1948).

Une histoire intéressante mais loufoque concerne l'utilisation de souches non mortelles de malaria pour traiter une forme grave de syphilis en 1917. Cela a en fait fonctionné parce que l'augmentation de la température corporelle générée par le paludisme a tué la bactérie de la syphilis. En 1922, le traitement a été effectué sur plusieurs patients, par exemple aux États-Unis ; en 1927, le développeur de la thérapie (Jauregg) a remporté le prix Nobel, mais peu après, suite à la découverte des antibiotiques, la stratégie de traitement n'a plus été utilisée (la pénicilline a été identifiée par Alexander Fleming et cette découverte lui a valu le prix Nobel en 1945 ; en 1940, l'antibiotique a été produit en grandes quantités).

Pour en revenir à l'assainissement de l'Agro Pontino, effectué sur ordre de Benito Mussolini, il convient de rappeler qu'il a été couronné de succès dans la mesure où l'incidence de la malaria a été considérablement réduite (c'était dans les années 1930). En 1944, ce résultat a été annulé par une attaque biologique des nazis, qui ont inondé les terres récupérées et répandu des moustiques infectés par la malaria. En quelques semaines, un travail qui avait coûté des années de sacrifice a été détruit et l'incidence de la malaria a augmenté rapidement : c'était une véritable guerre biologique dirigée contre les Italiens et les Alliés. Des moustiques sont lâchés dans l'Agro Pontino et en même temps les Allemands confisquent la plupart des stocks de médicaments (quinine) et confisquent les moustiquaires que possède la population afin de réduire la protection. Les Allemands inondent la campagne et installent des mines, sabotant le travail de récupération de Mussolini. Pendant au moins les trois années suivantes, les souffrances ont été terribles. La malaria a été utilisée avec succès comme arme biologique mais, comme on pouvait s'y attendre, la maladie et la mort ont également été enregistrées parmi les Allemands. Au cours de ces années, les Allemands ont mené des expériences inhumaines sur des prisonniers dans les camps de concentration afin d'acquérir davantage de connaissances sur le paludisme : en 1946, un Allemand responsable de ces terribles atrocités a été condamné pour *crimes contre l'humanité* et tué. Les Américains ont également mené des expériences cruelles sur les prisonniers, en utilisant divers micro-organismes, dont la malaria, et ces atrocités se sont poursuivies jusque dans les années 1960. En Asie, les Japonais ont expérimenté la guerre biologique sur les Chinois : ils ont tué au moins 580.000 personnes en distribuant par avion des mouches portant les agents du choléra et de la peste (en 2002, les Japonais ont confirmé leur responsabilité dans cette guerre biologique).¹²⁸³

Entre 1947 et 1980, la malaria a été combattue grâce à l'utilisation massive du DDT : sa production a été multipliée par près de 1.000 et son utilisation dans l'agriculture s'est généralisée. La distribution systématique de cet insecticide en Italie en 1948 a permis de ramener à zéro les décès dus au paludisme, et l'Europe a été considérée comme exempte de ce parasite en 1975. Des résultats similaires ont été enregistrés dans le monde entier avec

l'utilisation du DDT. Cependant, dans la longue lutte contre les moustiques, on a rapidement enregistré des souches d'insectes résistantes à la fois aux médicaments antipaludiques (par exemple l'artémisinine, le chrysotile, etc.). Les premiers moustiques résistants au DDT ont été identifiés en 1947 et confirmés en 1956 (les moustiques peuvent développer une résistance après une moyenne de sept ans d'exposition à l'insecticide, mais dans certains cas, on a signalé que les insectes étaient immunisés après seulement deux ans ; la résistance aux médicaments a également été signalée dans certains cas après seulement quelques années d'utilisation). Dans les années 1960, des souches résistantes au DDT ont été détectées dans la plupart des régions où ces vecteurs de maladie étaient présents. Aujourd'hui encore, le DDT est utilisé quelque part sur la planète, bien que les moustiques porteurs de la malaria soient souvent devenus résistants (le DDT est produit dans certains pays comme l'Inde et la Corée du Nord). Il est à remarquer que le moustique est revenu en Europe. Ainsi, en 1995, on a enregistré une épidémie de malaria qui a touché au moins 90.000 personnes.

Au moment où ces pages étaient écrites, la nouvelle est arrivée : le premier vaccin contre la malaria a été approuvé pour les enfants. L'Organisation mondiale de la santé a autorisé un médicament qui promet de sauver des centaines de milliers d'enfants, principalement en Afrique (rappelons que la vaccination a éradiqué la variole, qui a tué au moins 300 millions de personnes au XXe siècle).¹²⁸⁴ Le vaccin antipaludéen est recommandé pour prévenir la maladie causée par le *Plasmodium falciparum* et est administré en quatre doses à partir de l'âge de cinq mois. Ce vaccin n'éradiquera probablement pas la maladie mais pourrait réduire la mortalité de 30%.¹²⁸⁵
¹²⁸⁶ Le vaccin a été testé dans sept pays africains, mais les résultats n'ont pas été aussi bons qu'espérés : il a permis de prévenir le paludisme chez 56% des enfants âgés de 7 à 17 mois, et seulement 31% des enfants âgés de 6 à 12 semaines. En outre, l'efficacité du vaccin a diminué après un an. Toutefois, sur la base des résultats de l'essai, il a été conclu que, malgré son efficacité limitée, les avantages l'emportaient sur les risques.¹²⁸⁶

Malheureusement, de nombreux facteurs tels que le changement climatique, le déclin de la biodiversité et l'intensité des voyages (plus de 4,3 milliards de personnes se sont rendues dans un aéroport en 2018) laissent penser que les maladies transmises par les moustiques vont se propager. Aujourd'hui, les technologies offrent de nouvelles possibilités, parfois merveilleuses mais aussi effrayantes. La biotechnologie (par exemple, CRISPR) permet de concevoir en laboratoire et de mettre en œuvre l'extinction d'espèces, y compris les moustiques transmettant le paludisme. Il s'agit d'une nouvelle arme potentielle de destruction systématique qui, de plus, est bon marché et à la portée de petits laboratoires, et donc difficile à contrôler. La possibilité offerte par la biotechnologie de manipuler des écosystèmes entiers soulève des questions morales angoissantes, est biologiquement faillible et est certainement inquiétante : le génie est sorti de la bouteille et souffre d'un délire de toute-puissance.

LA SÉLECTION NON NATURELLE : LE CONTRÔLE GÉNÉTIQUE DES ESPÈCES ENVAHISSANTES OU CLASSÉES COMME NUISIBLES

Personne ne sait exactement combien d'espèces sont étrangères à un écosystème donné parce qu'elles ont été introduites accidentellement : probablement au moins 18.000 ; pour certaines espèces envahissantes, les dégâts sont très évidents. Au moins 2.500 espèces de plantes et 3.200 espèces d'insectes ont été classées comme envahissantes.¹¹³³ Pour certaines catégories d'organismes, comme les plus petits (micro-organismes), peu d'informations sont disponibles. Malheureusement, les espèces envahissantes ne sont pas seulement un problème pour l'agriculture ou la santé humaine, mais aussi pour les réserves naturelles et les aires marines protégées, qui couvrent environ 13% de la surface terrestre et 7,7% de la surface des mers. Les

espèces envahissantes réduisent la biodiversité. Certaines plantes modifient les caractéristiques du sol et favorisent les incendies. D'autres organismes facilitent la propagation des maladies ou sont des agents pathogènes ou des prédateurs des espèces indigènes. Les effets peuvent être rapides et dévastateurs. Par exemple, l'introduction de chats (*Felis catus*) dans de nouveaux environnements a entraîné l'extinction d'au moins 14 espèces de vertébrés, dont des oiseaux, des mammifères et des reptiles, et l'introduction d'un champignon parasite (*Batrachochytrium dendrobatidis*) a provoqué l'extinction de 90 espèces d'amphibiens.¹¹³³ La défense contre les espèces envahissantes est une question de biosécurité d'importance mondiale, reconnue comme une priorité par de nombreux pays (par exemple, l'Australie et la Nouvelle-Zélande). Diverses stratégies de contrôle ont été employées pour contrer la propagation des espèces exotiques, telles que les stratégies chimiques (par exemple, les pesticides, les phéromones), physiques (par exemple, le piégeage et/ou l'abattage) et biologiques (par exemple, la stérilisation). Les méthodes biologiques comprennent celles offertes par la biotechnologie.

Les biotechnologies permettent de modifier la variabilité génétique des êtres vivants de manière de plus en plus invasive et de moins en moins contrôlable. Avec la biotechnologie, le niveau de contrôle sur la biodiversité a atteint un potentiel sans précédent. Le génie génétique offre des outils qui peuvent être utilisés pour provoquer l'extinction d'une espèce. Dans ce cas, l'ingéniosité humaine inspirée par la nature dispose des moyens de modifier la biosphère de manière très rapide et irréversible. L'innovation technologique permet de réduire les coûts et de simplifier les procédures de laboratoire, les rendant accessibles à des groupes toujours plus nombreux. Ainsi, le contrôle des abus et des comportements éthiquement douteux devient difficile, voire impossible. Il devient plus facile de modifier de manière irréversible les plantes et les animaux, et certaines innovations biotechnologiques soulèvent également des questions juridiques, car l'innovation progresse plus vite que l'appareil qui fixe les règles. Par exemple, l'inactivation d'un gène naturel dans un organisme, à l'aide du système *CRISPR*, n'ajoute pas d'information étrangère : il s'agit d'êtres vivants génétiquement modifiés, mais différents des êtres vivants réglementés (en 2015, au moins 94% du soja et du coton, et 92% de l'ensemble du maïs cultivé aux États-Unis étaient classés comme des organismes génétiquement modifiés). La distinction entre naturel et non naturel devient de plus en plus difficile. Les modifications artificielles de l'ADN peuvent générer des changements importants car elles sont irréversibles mais parfois invisibles, c'est-à-dire difficilement identifiables en laboratoire (aucun matériel génétique étranger n'est ajouté).

Deux exemples de lutte contre les espèces envahissantes sont donnés.

- La mouche méditerranéenne des fruits (*Ceratitis capitata*) est un insecte phytophage. Ses larves se développent à l'intérieur de la chair de nombreux fruits. C'est l'un des ravageurs les plus importants sur le plan économique des fruits d'été produits en Méditerranée (il touche plus de 250 espèces d'intérêt agricole).¹⁰⁰⁴ En Australie, l'utilisation de mâles stériles pour éradiquer cet insecte remonte aux années 1980 et il a été éradiqué avec succès en 1984.¹⁰⁰⁶ Cette stratégie ne permet pas toujours d'obtenir les résultats souhaités. Malgré la libération de centaines de millions de mâles stériles, la mouche n'a pas été éradiquée en Californie.¹⁰⁰⁵ Les insectes élevés artificiellement étaient porteurs d'une mutation qui ne pouvait éliminer que les œufs de femelles, celles-ci ne résistant pas à l'incubation à haute température (un caractère lié au chromosome Y).

- En Afrique, la mouche *tsé-tsé* (*Glossina morsitans*) provoque la maladie du sommeil et fait 10.000 victimes par an (elle est un vecteur de la trypanosomiase africaine). L'utilisation de la technique de lâcher de mâles stériles (obtenus en les exposant à des rayons gamma) a permis d'éradiquer avec succès cet insecte en 1997 sur l'île d'Unguja à Zanzibar, un archipel tanzanien situé au large de l'Afrique de l'Est.¹⁰⁰⁷ Le rapport entre les mâles stériles relâchés par avion et les mâles sauvages était (en 1995) supérieur à 100 :1 (plus de 8,5 millions de mâles stériles ont été relâchés). Le temps

nécessaire pour permettre six générations depuis le dernier lâcher de mâles stériles a été suffisant pour générer l'éradication de cet insecte nuisible de l'île.¹⁰⁰⁸ Dix-huit ans plus tard, l'île était toujours exempte de cet insecte dangereux, ce qui confirme que, dans un environnement confiné, cette technique fonctionne. Ce qui est intéressant, c'est que pour réussir, le nombre d'insectes stériles à relâcher doit être énorme : 100 insectes reproducteurs pour chaque animal sauvage. Penser à éteindre des insectes répartis sur de plus grandes surfaces et avec des populations beaucoup plus importantes est irréalisable : il faudrait élever trop d'animaux.

Depuis, la science a fait des progrès, ce qui permet d'adopter des stratégies plus efficaces. Le génome de certains insectes, comme le moustique *anophèle*, a été séquencé : dans ce cas, il a été possible d'identifier les gènes essentiels à la transmission de l'agent de la malaria. Il a été possible de créer en laboratoire des moustiques anti-paludisme, c'est-à-dire des moustiques qui ne peuvent pas transporter le parasite. En distribuant dans l'environnement ces moustiques (mâles car ils ne piquent pas), dotés de nouveaux mécanismes génétiques conférés artificiellement, on peut espérer propager ces caractéristiques utiles à l'homme à toute la population d'insectes sauvages. Jusqu'à 100% de la descendance des mâles modifiés en laboratoire sera porteuse du changement souhaité (avec la reproduction sexuée, les gènes ont généralement 50% de chances d'être transmis dans la descendance). Il suffit d'attendre, et il n'est pas nécessaire de relâcher des quantités énormes d'insectes (ce qui pourrait favoriser la résistance au paludisme ou la stérilité génétique, comme cela a été fait avec les radiations). Il s'agit d'un nouveau pouvoir important et effrayant, notamment parce que de nombreuses nouvelles biotechnologies sont bon marché et donc accessibles à des laboratoires non spécialisés disposant de moins de ressources. La stratégie consistant à transmettre un caractère à toute la descendance, comme s'il s'agissait d'un caractère dominant homozygote, permet au caractère souhaité de se répandre très rapidement. Le mécanisme est appelé "*gene drive*", et le système *CRISPR* peut potentiellement être utilisé. Normalement, lors de la reproduction sexuée, chaque individu acquiert une copie de chaque chromosome de ses deux parents. Par conséquent, chaque variante d'un gène a une chance sur deux d'être héritée. Grâce à la biotechnologie (*CRISPR*) en laboratoire, il a été possible de démontrer qu'une caractéristique héréditaire (par exemple la couleur de la drosophile) peut être effectivement transmise dans 97% de la descendance. On pourrait alors envisager de faciliter la propagation de traits négatifs, comme la stérilité chez les moustiques femelles vecteurs de la malaria, qui est un trait récessif, à la majorité de la descendance. Ainsi, il n'est pas nécessaire de relâcher dans l'environnement plus d'individus modifiés en laboratoire que ceux que l'on trouve dans la nature. On peut espérer de façon réaliste être en mesure d'éteindre une espèce sauvage en relâchant dans l'environnement un petit nombre d'individus porteurs de traits négatifs qui ne sont pas transmis par les mécanismes de la génétique mendélienne. Les premières expériences dans la nature pour tenter d'éteindre les moustiques à l'aide de cette nouvelle stratégie génétique ont commencé il y a quelques années : la biotechnologie (par exemple le *gene drive*) est considérée comme moins dangereuse que l'utilisation de pesticides pour combattre les moustiques porteurs de maladies telles que le paludisme, le virus Zika, la fièvre jaune et bien d'autres qui, ensemble, causent plus d'un million de décès chaque année.¹⁰²⁹

Les moustiques sont les vecteurs de nombreuses maladies, comme le paludisme, qui tue plus de 400.000 personnes et en rend au moins 2 millions d'autres malades chaque année, en raison de la piqûre du moustique *anophèle* femelle (qui a besoin de sang pour nourrir ses œufs). Dans le monde, il a été possible de combattre cette maladie en tuant les moustiques porteurs du parasite, en utilisant d'énormes quantités d'insecticides comme le DDT (*dichloro-diphényl-trichloroéthane*) et en détruisant les milieux marécageux. Un exemple est l'histoire du programme d'éradication de la malaria en Sardaigne, mis en œuvre après la Seconde Guerre mondiale (les moustiques vecteurs sur l'île étaient *Anopheles abbranchiae*, *A. algeriensis* et *A.*

claviger). La Sardaigne, en Italie, était l'une des régions les plus touchées par la maladie : environ 2.000 à 2.200 décès par an pour une population de près de 800.000 habitants.¹⁰⁶⁹ Pour tenter d'éteindre les moustiques, qui sont probablement arrivés sur l'île en 502 avant J.-C., au moins 267 tonnes de DDT ont été distribuées dans les années 1940, à l'aide d'avions et d'hélicoptères. En juin 1947, au moins 85% des centres habités de la Sardaigne ont été traités avec cet insecticide (y compris l'intérieur des maisons). La maladie a été combattue mais les moustiques n'ont pas été éradiqués aussi complètement qu'on l'espérait (ils ont probablement été réduits de 99%). En 1950, pour la première fois, aucun cas de malaria n'a été enregistré sur l'île. Ce succès est dû à la synergie de plusieurs facteurs, dont l'utilisation d'insecticides, l'assainissement et la surveillance.

Les stratégies génétiques visant à éliminer les parasites tels que les moustiques qui transmettent l'agent de la malaria (*Plasmodium*) pourraient être variées. Il est possible de créer des moustiques qui ne peuvent pas transmettre le vecteur du paludisme en modifiant leurs caractéristiques génétiques. Les moustiques créés en laboratoire devraient être distribués dans la nature dans l'espoir qu'ils remplacent les populations naturelles au fil du temps. Une autre option consiste à éteindre le moustique vecteur en relâchant dans l'environnement un grand nombre d'animaux rendus stériles ou présentant des défauts génétiques létaux. En s'accouplant avec les populations naturelles, ils pourraient provoquer leur extinction. Cette stratégie implique, par exemple, la distribution de mâles stériles, et n'est pas une idée nouvelle, puisque, comme mentionné précédemment, elle a déjà été utilisée plusieurs fois avec succès. Cette méthode a été utilisée pour éradiquer la mouche *Cochliomyia hominivorax*, dont les larves (dans les zones tropicales du Nouveau Monde) sont capables de se nourrir des tissus vivants de divers animaux, dont l'homme. Dans ce cas, la distribution de mâles stériles (des millions d'insectes), obtenus en les exposant à des radiations, a permis d'éradiquer ces insectes dangereux de nombreux territoires : en 1982, ils ont été éradiqués aux États-Unis et en 1991, l'éradication a été réalisée en Afrique du Nord, où l'insecte était une espèce exotique.^{1002, 1003}

Il est désormais possible de concevoir des stratégies moins coûteuses et plus durables, comme le lâcher dans la nature d'insectes génétiquement modifiés (*CRISPR*) capables de propager des caractéristiques autodestructrices.¹⁰⁷⁵ Ainsi, il suffit théoriquement de relâcher un nombre d'insectes égal à une fraction de la population naturelle et d'attendre. Grâce aux biotechnologies les plus avancées (*gene drive*), on peut espérer surmonter l'obstacle que constitue la nécessité de relâcher un nombre considérable d'animaux sélectionnés en laboratoire afin d'éliminer les insectes sauvages. Avec des modifications génétiques appropriées, la probabilité de transmettre les caractéristiques génétiques souhaitées est augmentée. Ainsi, comme l'illustre la figure ci-dessous, il est possible d'introduire dans l'environnement un nombre d'insectes génétiquement modifiés égal à 1% de la population naturelle pour espérer que les caractéristiques génétiques introduites se propagent à la majorité des individus en quelques générations (dans la figure ci-dessous, on voit à gauche la transmission héréditaire d'un caractère récessif selon la génétique mendélienne et à droite la transmission permise par le système *CRISPR*).¹⁰⁶⁵ En laboratoire, en utilisant le système *CRISPR/Cas9* chez les moustiques (*Anopheles gambiae*), il est possible de favoriser la propagation de la stérilité chez les femelles, provoquant l'effondrement de la population en moins de 11 générations (les femelles homozygotes pour le caractère artificiellement muté sont stériles).¹⁰⁷² Il devient possible d'espérer faire disparaître les moustiques, et donc le paludisme, des zones les plus touchées de la planète (par exemple le Nigeria ou la République démocratique du Congo) d'ici quatre ans.¹¹³⁷

Diverses altérations génétiques héréditaires peuvent être introduites en laboratoire et conduire à l'affaiblissement et à l'effondrement de populations de moustiques comme *Anopheles gambiae* et *Aedes aegypti*, par exemple en inactivant un gène important pour la production d'œufs (le gène de la vitellogénine) ou en inhibant une importante activité enzymatique dans le sang. Dans ces expériences, le système *CRISPR* a été injecté dans le thorax des moustiques.¹¹³⁸

Un autre type de gène identifié par les chercheurs comme une cible possible pour réduire le nombre de moustiques dans la nature est celui des muscles de vol. Chez les moustiques (par exemple *Aedes aegypti* et *Culex quinquefasciatus*), il a été possible d'identifier un gène qui produit une protéine essentielle au vol chez les femelles uniquement.^{1141, 1143} On peut donc espérer réduire la population sauvage en favorisant les caractéristiques qui rendent les femelles inaptes au vol (les mâles, même homozygotes pour la mutation, ont des ailes normales et sont capables de voler et de se reproduire ; chez les femelles, même la condition d'hétérozygotie, c'est-à-dire celles qui possèdent encore une copie du gène qui n'est pas muté, peut altérer le vol).

¹¹⁴³

Il faut rappeler que chez ces insectes, c'est la femelle qui pique et transmet la maladie. Une autre stratégie exploite donc la modification du rapport entre les mâles et les femelles. En agissant sur les gènes appropriés, on peut espérer obtenir (à partir d'une fréquence allélique de la mutation de 2,5%) l'effondrement de la population (d'*Anopheles gambiae*) en moins de 14 générations, en raison du nombre réduit de femelles par rapport aux mâles.¹¹⁴⁴

Perturber l'expression de certains gènes chez les insectes vecteurs de nombreuses maladies, comme les moustiques, est une nouvelle stratégie pour lutter contre de graves problèmes de santé. Pour que la modification génétique soit stable, elle doit être transmise dans les cellules germinales. Travailler sur des embryons ou des zygotes de moustiques pour obtenir une modification qui soit définitivement héritable demande plus d'expérience car c'est plus difficile. Pour surmonter cet obstacle technique, on a déjà conçu des vecteurs moléculaires qui sont injectés aux adultes mais modifient les cellules germinales (chez *Anopheles stephensi*).¹¹³⁹

Ces études suggèrent que de nouveaux outils pourraient être disponibles pour combattre des maladies graves. Cependant, il peut y avoir des événements imprévus et sous-estimés, comme le développement de systèmes pouvant contrecarrer et inverser les effets souhaités par les chercheurs. Par exemple, les moustiques peuvent présenter des mutations susceptibles de neutraliser les effets de l'*entraînement génétique* (du système *CRISPR*).¹¹⁴⁰ Pour améliorer la sécurité de ces technologies, il convient de concevoir des systèmes réversibles (il doit être possible de restaurer le gène précédemment désactivé) et limités à certaines populations seulement (par exemple en choisissant des gènes cibles qui sont présents de manière quasi exclusive ou prédominante dans la population cible et non chez tous les individus de l'espèce ou chez la plupart d'entre eux).

Un autre objectif pourrait être d'éviter d'exterminer les moustiques, mais plutôt de diffuser des caractéristiques génétiques qui les rendent incapables d'être des vecteurs de maladies, par exemple en inactivant l'expression d'une protéine dans les glandes salivaires du moustique (*Anopheles gambiae*) qui joue un rôle clé dans le développement de l'agent du paludisme (*Plasmodium berghei* et *Plasmodium falciparum*).¹¹⁴² En laboratoire, les moustiques mutants montrent en fait une capacité réduite à entretenir la propagation de l'agent du paludisme. Cette approche vise à créer des insectes immunisés ou moins capables d'héberger et donc de propager le parasite. Il sera nécessaire de comprendre si l'absence de production de cette protéine (salivaire dans ce cas) rend l'insecte moins apte à survivre dans des conditions naturelles.

Un autre groupe de recherche a suivi la même stratégie et a obtenu des moustiques transgéniques (*Aedes aegypti*) ayant une capacité réduite à transmettre une maladie grave causée par un virus (Zika). Les moustiques femelles, obtenues en laboratoire, contiennent beaucoup moins de virus dans leurs glandes salivaires.¹¹⁴⁵ En exploitant la capacité naturelle de certains moustiques à être incapables de transmettre le virus, il est possible d'essayer de répandre cette caractéristique dans la population de moustiques sauvages.

Une des techniques consiste à désactiver la synthèse d'une protéine en désactivant la fonction des acides ribonucléiques messagers dans le cytoplasme de la cellule. La technique d'interférence avec l'activité des ARN messagers est basée sur le transfert artificiel dans l'animal adulte (par exemple un moustique) d'un vecteur d'une double hélice d'ARN, qui contient

l'information nécessaire pour atteindre la séquence de l'ARN cible et générer une cascade qui le détruit.^{1127, 1154} L'effet final est l'absence de production d'une protéine déterminée et choisie en laboratoire. Il est ainsi possible d'étudier les effets de l'arrêt des gènes dans des conditions contrôlées. Les génomes de nombreuses espèces de moustiques ont été séquencés, de sorte que les séquences nécessaires pour désactiver une cible plutôt qu'une autre peuvent être conçues en laboratoire. Dans le cas des moustiques, différentes techniques peuvent être utilisées pour transférer l'acide nucléique qui doit inhiber la synthèse de la protéine désirée : trempage des larves dans une solution contenant l'ARN interférent, injection dans le corps de l'insecte, ingestion de nanoparticules qui transportent l'ARN dans le tube digestif et le protègent des enzymes digestives, utilisation de microbes vecteurs (bactéries, levures et adénovirus) et d'algues.¹¹²⁷ Les bactéries et les algues génétiquement modifiées pour transporter des acides nucléiques peuvent être intégrées (mortes ou vivantes) dans les aliments. Les microbes sont faciles à manipuler en laboratoire et protègent le matériel génétique à transporter à l'intérieur de l'insecte. L'utilisation de microbes et de nanoparticules pourrait permettre des applications pour combattre également certains parasites des plantes.

Afin d'obtenir des moustiques mâles aux caractéristiques génétiques défavorables, il est nécessaire, lors de la reproduction, d'éliminer les femelles (également parce qu'elles piquent). L'une des techniques consiste à transformer génétiquement les insectes de sorte que, lorsqu'ils sont élevés en présence d'une substance (par exemple, l'antibiotique tétracycline), ils désactivent des fonctions fondamentales : par exemple, ils naissent sans ailes et sont donc incapables de vivre dans la nature.¹¹³⁵

La guêpe commune (*Vespula vulgaris*) est une espèce typique de l'hémisphère nord, bien qu'elle soit également répandue et acclimatée en Australie et en Nouvelle-Zélande où elle est considérée comme une espèce invasive. Elle est répertoriée comme l'une des 100 espèces exotiques envahissantes les plus nuisibles au monde.¹¹²⁵ La reine des guêpes, qui est la fondatrice de la colonie, est la seule à pondre les œufs (qui se comptent par milliers) dont s'occupent les ouvrières. Les nids peuvent accueillir plus de 10.000 spécimens. En modifiant avec le système *CRISPR/Cas9* l'activité des gènes responsables de la spermatogenèse chez les mâles, on espère pouvoir contrôler la taille de la population dans les endroits où elle a été introduite.¹¹²⁴ En altérant la capacité à produire des spermatozoïdes fertiles, on peut produire des mâles infertiles. En répandant les individus génétiquement modifiés dans la population sauvage, on espère diminuer la population sauvage en 10 générations, c'est-à-dire en 10 ans (dans les conditions de la Nouvelle-Zélande, en distribuant 100 insectes modifiés par 100 hectares, où il y a en moyenne 13,5 nids sauvages par hectare). Pour parvenir à l'éradication, il faudrait que la mutation causant la stérilité mâle soit répandue chez au moins 96% des reines-guêpes. Avec le système *CRISPR*, il est possible de penser à propager des mutations pour éradiquer l'espèce ou simplement la réduire numériquement. Ainsi, au moins en théorie, il est possible de concevoir des expériences biotechnologiques visant à réduire la population sans l'éteindre complètement (stérilité partielle).¹¹²⁴ Il sera probablement bientôt possible d'étendre cette pratique du *gene drive* à d'autres espèces de guêpes, comme le frelon asiatique (*Vespa velutina*), également appelé frelon à pattes jaunes, qui est un hyménoptère originaire du sud-est de l'Asie. Il est introduit en Europe depuis 2005 et préoccupe les apiculteurs car c'est un prédateur efficace des abeilles.

Les techniques biotechnologiques peu coûteuses et assez simples ouvrent de nouvelles possibilités mais peuvent avoir des effets secondaires imprévus et négatifs : par erreur ou par accident, le système biotechnologique conçu pour nuire à une espèce considérée comme nuisible pourrait se propager à des insectes très utiles comme les abeilles domestiques, les bourdons ou d'autres espèces de guêpes. En outre, la caractéristique génétique létale pourrait se propager accidentellement dans des endroits où l'insecte n'est pas envahissant, même longtemps après le dernier lâcher artificiel dans la nature. Peut-être ne vaut-il pas la peine de prendre de tels

risques, même en laboratoire. Le bon sens suggère que nous ne devrions absolument pas concevoir des expériences dans des laboratoires situés dans des zones géographiques où les insectes sont sauvages et, par conséquent, naturellement présents. Nous ne pouvons pas prévoir la cascade de tous les effets et événements possibles, surtout à une certaine distance dans le temps. Les animaux génétiquement modifiés, une fois libérés dans un environnement où ils ne sont pas indigènes, peuvent, avec le temps, arriver dans des zones où des individus sauvages sont naturellement présents. En d'autres termes, les animaux mutés peuvent devenir envahissants et mortels dans des zones où se trouvent leurs ancêtres sauvages, non modifiés en laboratoire. Dans ce cas, on peut parler d'une invasion de retour post-générique. Si le système biotechnologique d'autodestruction des horloges fonctionnait bien, il pourrait également générer à terme l'extinction des espèces sauvages dans l'environnement naturel. Une véritable catastrophe écologique. La seule façon de s'assurer que cela ne se produise pas est de ne pas insister sur ce point. Nous sommes peut-être présomptueux, car la nature est susceptible de contrecarrer d'une manière ou d'une autre cette pollution génétique mortelle de l'ingéniosité humaine.

Divers essais sont également menés dans le secteur agricole en vue d'applications futures probables. Un exemple est le papillon nocturne connu sous le nom de papillon jaune de la tomate (*Heliothis armigera*). Ce papillon se trouve en Europe, en Afrique, en Asie, en Australie et en Nouvelle-Zélande. Extrêmement polyphage, dans les régions subtropicales il infeste principalement le coton et le maïs. En Italie, il endommage les cultures de tomates, mais aussi beaucoup d'autres : poivrons, aubergines, pommes de terre, tabac, fèves, pois, haricots, artichauts, cucurbitacées, salades et cultures ornementales.¹¹²⁹ Dans le sud de l'Italie, le papillon *Heliothis armigera* effectue jusqu'à quatre générations par an, avec les occurrences les plus nombreuses de juillet à septembre. Les femelles peuvent pondre entre 300 et 2.700 œufs, selon les conditions environnementales. Ceux-ci sont pondus de manière isolée ou en groupe sur la végétation des plantes hôtes. Les larves mangent des feuilles, des fleurs et des baies. Les insectes ne peuvent pas synthétiser certaines graisses (stéroïdes comme le cholestérol), qui doivent donc être ingérées par l'alimentation. Le système *CRISPR/Cas9* a été utilisé pour perturber la production d'une protéine (une protéine membranaire appelée *NPC1b*) nécessaire à l'absorption des graisses indispensables à la survie.¹¹²⁸ Les larves chez qui ce gène a été désactivé meurent. Chez les insectes génétiquement modifiés, la protéine ne se trouve pas dans l'intestin, où elle est normalement présente. Ce gène pourrait être une cible pour espérer diffuser artificiellement un génotype ayant un effet insecticide.

Dans la nature, les larves de *Heliothis armigera*, comme celles d'autres papillons, sont très sensibles aux maladies causées par le virus de la polyédrose nucléaire. Isolés principalement des lépidoptères, les virus de la polyédrose nucléaire sont des pathogènes endocellulaires obligatoires qui ont besoin d'une cellule viable pour se reproduire. Appartenant au groupe des baculovirus, ils sont présents dans de nombreux environnements à travers un spectre d'hôtes étroit, qui ne comprend ni plantes ni vertébrés.¹¹³⁰ Le virus doit être ingéré par les larves et les effets ne sont pas immédiats (les agriculteurs sont habitués à ce que les effets des insecticides soient visibles après quelques minutes ou heures). Il existe des produits commerciaux basés sur ce virus (Baculovirus) qui sont utilisés en agriculture contre différents insectes.¹¹³¹ La distribution dans les champs agricoles de solutions contenant des virus élevés en laboratoire (sur le même papillon que celui contre lequel ils sont utilisés en plein champ) pour lutter contre les insectes nuisibles aux cultures pourrait générer des effets indésirables et inattendus (par exemple, nuire aux espèces non ciblées). Là encore, il s'agit d'une expérience dangereuse dont les effets à long terme sont inconnus.

Ces possibilités sont étonnantes et terrifiantes dans la mesure où l'utilisation de techniques biotechnologiques bon marché pourrait facilement permettre à un petit groupe de chercheurs de planifier l'extinction d'une espèce sans aucun contrôle, en agissant secrètement.

La libération dans la nature d'animaux présentant ces modifications devrait être interdite : les applications militaires, telles que les armes biologiques, ou celles visant à obtenir des avantages peuvent être nombreuses. Comment éviter les expériences dangereuses lorsque les technologies sont relativement simples et bon marché ?

Malheureusement, des expériences visant à relâcher des insectes génétiquement modifiés (par exemple des moustiques mâles stériles) dans la nature sont menées depuis plus de 10 ans. Des insectes génétiquement modifiés ont été lâchés dans des pays tels que le Brésil et l'île britannique de Grand Cayman. En Floride (dans les Keys), un déploiement massif d'insectes transgéniques (contenant un gène dominant léthal) est prévu pour 2021 afin de lutter contre les moustiques (*Aedes aegypti*) devenus résistants aux insecticides.^{1069, 1070} En Afrique, des moustiques modifiés (*Anopheles gambiae*) sont lâchés grâce à diverses biotechnologies. La première phase consiste à relâcher des mâles stériles, incapables de produire une descendance lorsqu'ils sont accouplés avec des femelles sauvages. Dans une deuxième phase, les mâles fertiles sont libérés, mais ils produisent principalement d'autres mâles.¹¹³⁶

Au Brésil, dans la ville de Jacobina, considérée comme entourée de barrières géographiques suffisantes pour empêcher le déplacement naturel des moustiques, 450.000 moustiques mâles génétiquement modifiés ont été lâchés chaque semaine pendant au moins 27 semaines (entre 2013 et 2015).¹⁰⁷¹ Un suivi ultérieur (27 à 30 mois après la libération massive de moustiques mâles transgéniques) a montré l'apparition d'individus capables de se reproduire et possédant dans leur génome des traits des insectes transgéniques. Ce résultat confirme que perdre le contrôle de la situation est plus facile que l'on pourrait le croire. Des "hybrides" transgéniques capables de se reproduire dans la nature ont été créés involontairement. En outre, les moustiques transgéniques ont été créés à partir d'une population d'insectes mexicains, de sorte qu'une nouvelle souche a été créée à partir du mélange artificiel de trois populations, une conçue en laboratoire et une étrangère. Les recherches antérieures, qui ont permis aux autorités d'approuver les lâchers dans la nature, n'avaient pas prévu cette catastrophe écologique. Les conséquences involontaires de la libération d'animaux génétiquement modifiés dans la nature peuvent être imprévisibles et ne peuvent être déterminées en laboratoire.

Les gènes liés à la ponte constituent une cible possible pour tenter de combattre les agents pathogènes des insectes. Les fonctions de plusieurs catégories de gènes impliqués dans la production et la ponte des œufs ont été découvertes. Ces gènes sont des cibles potentielles utiles pour tenter d'obtenir des animaux capables de transmettre l'incapacité à achever la production d'œufs.¹¹¹⁹ Par exemple, chez l'abeille domestique, le gène de la vitellogénine est impliqué dans de nombreuses fonctions telles que la fonction ovarienne et est présent chez de nombreux autres insectes. L'insecte hyménoptère *Nasonia vitripennis* est un parasitoïde des mouches agricoles. Cet insecte utile est utilisé dans la lutte biologique contre les mouches et des gènes affectant la production d'œufs et de sperme ont été identifiés.^{1119, 1120, 1121} L'insecte *Rhodnius prolixus* est un hémiptère qui peut transmettre un parasite redoutable à certaines plantes.¹¹²² En inhibant la production d'une protéine (*Autophagy-related protein 8* ou *ATG8*), la capacité de ponte est altérée (inactivation obtenue par la technique de l'interférence ARN).¹¹¹⁹

Plus de 1.000 gènes ont été identifiés chez les insectes qui pourraient constituer une cible génétique utile pour des caractéristiques de survie défavorables : ceux de la production de vitellus, ceux qui régulent le développement des ovaires, ceux de la mue et de l'embryogenèse, ceux qui produisent des récepteurs pour des odeurs particulières ou ceux de la sensibilité à la couleur (favorisant la localisation de la plante hôte). Parmi les protéines importantes, certaines influencent le comportement reproducteur, comme le choix du site de ponte (*protéine de liaison à la phéromone*, présente chez de nombreuses espèces d'insectes) ou l'identification de l'odeur de la plante hôte à parasiter par la ponte. En théorie, en désactivant un seul gène, il est possible d'obtenir un désavantage reproductif léthal à propager chez les insectes sauvages. Comme on peut

l'imaginer, les surprises pourraient facilement décevoir et le risque de répandre des animaux modifiés dans l'environnement doit être évité.

Une autre possibilité consiste à produire en laboratoire des souris vectrices de maladies : la souris à pieds blancs (*Peromyscus leucopus*) peut être un vecteur de la maladie de Lyme, causée par une bactérie (*Borrelia burgdorferi*). Ce micro-organisme est transporté par une tique (*Ixodes scapularis*) sur les cerfs et touche au moins 300.000 Américains chaque année. Il est possible de planifier la libération d'animaux génétiquement modifiés dans la nature afin de répandre l'incapacité de transmettre la maladie.¹⁰⁷⁴ Avec cette stratégie, on peut espérer interrompre la transmission de la maladie dans l'ensemble de l'écosystème en agissant sur un hôte important : la souris. Le biocontrôle génétique peut être conçu pour réduire la présence numérique d'un sexe, de manière à favoriser les déséquilibres qui peuvent conduire à l'effondrement de la population de rongeurs.¹¹⁵⁰

Les souris et les rats transportés par les activités humaines dans certains endroits de la planète sont la principale cause de prédation sur les espèces d'oiseaux (ils mangent les œufs) et les reptiles, comme c'est le cas en Nouvelle-Zélande. Sur certaines îles de Nouvelle-Zélande, il a été possible d'éradiquer un rat envahissant (*Mus musculus*) en utilisant des appâts toxiques (distribués par hélicoptère à des doses de 8 kg/ha).¹¹⁵⁰ Des centaines de projets d'éradication de rongeurs sur des petites îles du monde entier ont été couronnés de succès : au moins 637 projets jusqu'en 2017, dont la plupart ont utilisé le rodenticide anticoagulant brodifacoum délivré dans de la cire ou des graines de céréales. Cette pratique s'est en fait également avérée infructueuse et n'a généralement fonctionné que sur les petites îles.

L'éradication des rongeurs a été réalisée avec succès en utilisant des appâts empoisonnés également en Italie, où dans 14 îles il a été possible d'éradiquer le rat (*Rattus rattus*), avec la gestion d'un plan qui employait des rodenticides (en utilisant entre 4 et 10 distributeurs de rodenticides/hectare contenant de la bromadiolone et/ou du brodifacoum, dans les années 1999-2017).¹¹⁵⁰ Dans les îles méditerranéennes, le rat a été la cause de la réduction des oiseaux de mer (tels que *Calonectris diomedea* et *Puffinus yelkouan*). L'éradication des rats a entraîné une augmentation significative des colonies d'oiseaux nicheurs sur les îles. Cependant, il n'est pas certain que l'éradication soit définitive, car les rats pourraient être à nouveau transportés sur les îles, soit accidentellement, soit volontairement, comme cela s'est produit lors de la tentative d'éradication sur l'île de La Scola en Toscane. Dans ce cas, au moins trois nouvelles invasions ont été enregistrées dans les 15 années qui ont suivi l'éradication, probablement en partie à cause d'introductions volontaires par des saboteurs du projet.¹¹⁵⁰

L'utilisation de poisons (insecticides tels que le Fipronil) a permis d'éradiquer la fourmi d'Argentine (*Linepithema humile*) d'une petite île de Nouvelle-Zélande (220 ha).¹¹⁵⁰ La distribution systématique d'appâts empoisonnés, voire l'utilisation d'hélicoptères pour éteindre les rongeurs, ou d'insecticides génère certainement des effets indésirables sur les organismes non ciblés. Par exemple, la *warfarine*, un rodenticide, a entraîné l'émergence de populations de rats résistantes à cette molécule, et des appâts empoisonnés à base de céréales ou de cire ont également été consommés par d'autres animaux : oiseaux, escargots et insectes.

Les rongeurs tels que les souris (*Mus musculus*) et les rats (*Rattus rattus* et *Rattus norvegicus*) sont des vecteurs de diverses maladies et constituent des espèces envahissantes très dangereuses. Les rongeurs constituent une menace pour de nombreuses espèces sauvages. Des efforts sont donc déployés pour développer des stratégies moléculaires visant à réduire ce risque. Une possibilité serait d'encourager la propagation de traits génétiques qui rendent le sperme non viable.¹¹⁴⁶ En exploitant le comportement de la femelle qui s'accouple avec plus d'un mâle, on espère amplifier la propagation de traits génétiques qui peuvent contribuer à réduire le nombre de ces animaux. Grâce à la technique du *gene drive*, on espère dépasser la fréquence de transmission des caractères héréditaires prévue par la loi de Mendel. En modifiant les gènes du chromosome mâle (Y), il est possible d'inactiver les spermatozoïdes. Les mâles hétérozygotes

transmettent le caractère négatif à 100% de leur descendance (au lieu de 50%) : les femelles (XX) auront le phénotype des mâles, donc les femelles fertiles auront tendance à disparaître dans la population. ¹¹⁴⁶ Ainsi, en relâchant les mâles modifiés, on peut espérer une réduction drastique du nombre d'animaux sauvages en quelques générations.

La biotechnologie permet également de concevoir des animaux dont les caractéristiques génétiques ne permettent pas la reproduction entre individus modifiés et sauvages. Ces facteurs de compatibilité peuvent se manifester de la manière la plus complète chez les individus obtenus par accouplement d'animaux sauvages avec ceux que l'on trouve dans la nature. En théorie, en modifiant des animaux sauvages (par exemple des insectes) avec cette caractéristique génétique artificielle, on pourrait créer de nouvelles voies d'évolution qui favoriseraient la spéciation. Une population d'animaux pourrait être utilisée pour en créer deux, dont l'un a été modifié en laboratoire et est incapable de produire une descendance fertile s'il s'accouple avec des animaux sauvages (les animaux modifiés sont capables de produire une descendance fertile lorsqu'ils s'accouplent entre eux). ¹¹³² Les applications possibles sont diverses, comme la réduction de la possibilité de mélange génétique entre les animaux de laboratoire et les animaux sauvages.

Ce ne sont là que quelques-unes des possibilités d'éradication des espèces exotiques, car il existe en fait de nombreuses applications, utilisant des stratégies complètement différentes selon la catégorie d'être vivant à contrôler. ¹¹⁵⁰

Les espèces extraterrestres qui sont génétiquement modifiées dans le but de favoriser artificiellement leur autodestruction peuvent retourner à l'endroit d'où elles sont parties. Les espèces qui ont colonisé de nouveaux environnements à la suite de la migration humaine peuvent retourner accidentellement à leur emplacement d'origine. Elles sont porteuses de la modification génétique des espèces envahissantes, car elles sont capables de nuire à leurs congénères sauvages dans l'environnement où elles vivent naturellement. On pourrait appeler cela une invasion de retour d'émigrants génétiquement modifiés. Les effets de l'invasion biologique et de l'invasion de retour dans les habitats naturels des animaux génétiquement modifiés pourraient générer des effets écologiques désastreux. Les problèmes les plus importants peuvent ne devenir apparents qu'après une longue période. Dans les pays riches en environnements sauvages et en espèces uniques, la protection des êtres vivants est une priorité nationale (par exemple, l'Australie, la Nouvelle-Zélande). ¹¹³³ La dissémination d'organismes modifiés dans l'environnement, qu'elle soit autorisée ou non, semble de plus en plus inévitable. Les technologies s'améliorent, les expériences se multiplient et les espèces considérées comme nuisibles continuent à générer de nombreux problèmes. La libération d'organismes vivants destinés à contribuer à la réduction du nombre d'espèces classées comme nuisibles présente de nombreux risques, pour la plupart inconnus et impossibles à gérer. La libération d'individus modifiés à des fins de biocontrôle génétique (par exemple par le biais du *gene drive*) n'est pas compatible avec l'application du principe de précaution. ¹¹⁴⁹ Dans les situations où il y a peu d'indices de dommages potentiels graves et irréversibles, il est prévoyant de les prévenir. Le principe de précaution doit être appliqué lorsque les informations scientifiques sont insuffisantes pour exclure les risques, afin d'éviter des dommages irréversibles.

L'humanité est imparfaite, elle investit d'énormes quantités d'énergie dans la préparation des conflits ou la conduite des guerres : il y a eu au moins 38 conflits armés violents classés comme des guerres dans le monde en 2019. ^{1066, 1067, 1068} Nous sommes le produit d'un processus évolutif incomplet et en constante évolution : comment pouvons-nous espérer empêcher que la biotechnologie soit utilisée à des fins militaires ou par des terroristes ou des fous ? Il s'agit là d'un aspect sombre et effrayant de l'innovation technologique, qui montre clairement qu'elle progresse beaucoup plus vite que la capacité de la société humaine à développer des mécanismes sociaux et génétiques qui inhibent sa propre capacité de destruction. Les biotechnologies sont fascinantes mais en même temps très inquiétantes. Ces expériences devraient probablement être évitées et, en tout état de cause, il faudrait s'assurer qu'il existe des

barrières physiques et géographiques insurmontables sur les sites où se trouvent les laboratoires, afin d'éviter la libération accidentelle d'animaux modifiés dans la nature. Le potentiel offert par ces technologies bon marché et accessibles est alarmant. Malheureusement, les applications militaires ou celles visant à porter atteinte à la sécurité et à la souveraineté alimentaires d'un territoire sont également grandement favorisées.

La dégradation de l'environnement et l'extinction massive réduisent considérablement les chances de survie de nombreuses espèces. La biotechnologie peut offrir le moyen de sauver la diversité génétique érodée de nombreuses espèces animales et végétales dont le nombre est si réduit qu'elles ont peu de chances de survie. La réduction du nombre d'individus, ainsi que de nombreux autres facteurs, réduit la variabilité génétique et donc la possibilité de surmonter la sélection naturelle (mais aussi la sélection artificielle imposée par la dégradation par l'homme) faute de la diversité nécessaire. Pour atténuer ce désastre humain, la biotechnologie offre une issue : modifier artificiellement les plantes et les animaux pour les rendre capables de survivre à certaines adversités telles que les agents pathogènes. Par exemple, le châtaignier d'Amérique est dévasté par un champignon venu du Japon. Il est possible de générer en laboratoire des plantes génétiquement modifiées auxquelles on donne artificiellement la capacité de résister au champignon en insérant des caractéristiques génétiques naturellement présentes dans la céréale. Devons-nous laisser les châtaigniers être détruits par le champignon ou devons-nous autoriser la reforestation avec des plantes génétiquement modifiées ? L'espèce humaine, pour se défendre de sa propre dégradation, ajoute d'autres variables en rendant l'environnement de plus en plus artificiel et contrôlé par l'innovation technologique, plutôt que par la nature. La perspective qui se présente est celle de contrer l'extinction de certaines espèces, résultant du désastre causé par l'humanité, en manipulant la nature à un niveau plus intime et irréversible. Le niveau d'intrusion et de pari sur la sélection, qui est de plus en plus déterminée par l'ingéniosité humaine, est sans précédent.

Un autre exemple impressionnant et macabre est la tentative de faire revivre des espèces disparues en les clonant en animaux similaires, à l'aide de cellules provenant de tissus conservés dans des congélateurs. Les scientifiques ont fait cet essai avec le bouquetin des Pyrénées (*Capra pyrenaica pyrenaica*). À la fin des années 1980 et au début des années 1990, une dizaine d'animaux ont survécu.¹⁰⁶² En 2000, le dernier bouquetin des Pyrénées vivant, une femelle, a été retrouvé mort et l'espèce s'est éteinte. Il a été décidé d'essayer de ressusciter l'espèce par clonage, car il n'y avait pas d'autre possibilité, mais l'animal obtenu par biotechnologie est mort peu après sa naissance.¹⁰⁶³ Malgré les efforts de dés extinction biotechnologique, il n'a pas encore été possible de produire une descendance pure et viable à partir de spécimens éteints, bien qu'une telle tentative ait déjà été faite à plusieurs reprises.¹⁰⁶⁴

LA FERME AVEC LE PROGRAMME GÉNÉTIQUE HUMANISÉ

L'humanité est pour la première fois capable d'intervenir dans les codes génétiques créés par la nature (ou selon les religieux par le Créateur). Il n'est pas facile de prévoir quelles seront les conséquences pratiques (par exemple, nous savons peu de choses sur les interactions entre les différents gènes, et entre les gènes et l'environnement). Il sera certainement difficile d'espérer arrêter l'expérimentation de ces nouvelles biotechnologies sur l'homme. Malheureusement, la biotechnologie permet des applications dangereuses ou délibérément nuisibles. La modification de la lignée germinale humaine devrait être interdite, mais malheureusement, quelques années seulement après les premiers essais sur l'homme, elle est déjà considérée comme une technologie moralement acceptable lorsqu'il s'agit de prévenir les maladies. La gestion de l'hérédité en laboratoire pour prévenir le handicap et les problèmes de santé est désormais une réalité. Même si nous parvenons à promouvoir et à faire partager une interdiction mondiale, le

travail se poursuivra probablement de manière invisible ou dans les quelques endroits où il n'y a pas de restrictions. Nous pourrions les appeler des *paradis de l'eugénisme* qui, en fait, existent déjà : pensons aux procédures de fécondation in vitro, aux enfants à trois parents et à d'autres procédures qui ne sont pas autorisées dans tous les pays.

De nombreux scientifiques ont demandé l'arrêt, au moins temporaire, des expériences sur les lignées germinales humaines, mais il existe depuis longtemps des cliniques offrant d'innombrables services dans de nombreux pays du monde. La possibilité de redessiner les caractéristiques génétiques des êtres humains devient une réalité. À l'instar de nombreuses applications que l'espèce humaine aurait dû abandonner parce qu'elles étaient dangereuses ou immorales, comme les armes nucléaires et les médicaments, la biotechnologie ne sera pas freinée. De nombreuses applications sont sur le point d'envahir la biosphère pour remplir nos tables, alimenter la médecine et diverses industries.

La biotechnologie accroît considérablement la capacité de l'homme à modifier la biosphère et à changer son destin génétique. La vitesse des changements possibles est énormément accrue, tant ceux qui sont considérés comme positifs d'un point de vue anthropocentrique, que ceux qui sont considérés comme nuisibles, comme les armes biologiques. La question de savoir si la biotechnologie, comme beaucoup d'autres technologies, nous aidera à améliorer la vie (par exemple à éradiquer les maladies génétiques monofactorielles héréditaires) ou au contraire à accélérer le rythme de dégradation de la planète (appauvrissement de la biodiversité) reste ouverte. Il est certain que si l'on considère certaines des applications biotechnologiques les plus cultivées dans le monde, comme les plantes génétiquement modifiées pour résister aux herbicides, ceux qui en ont profité sont principalement les gestionnaires de cette technologie, les détenteurs de brevets et les vendeurs de ces technologies. L'innovation progresse beaucoup plus vite que la capacité à faire évoluer les mécanismes sociaux (et génétiques) d'autodéfense. Nous ne sommes pas préparés à faire face à une telle capacité d'intervention dans les mécanismes les plus secrets de l'évolution et à la possibilité effrayante d'altérer les équilibres écologiques qui se sont révélés gagnants au cours de millions d'années d'évolution. Nous sommes optimistes si nous pensons que nous pouvons prédire les effets d'une perturbation aussi puissante de la biosphère. Il est fort probable que même les applications que nous considérons comme les plus utiles, les plus nécessaires et les moins risquées nous réservent de mauvaises surprises, comme la conception en laboratoire d'embryons humains exempts de certaines maladies.

La libération massive d'organismes génétiquement modifiés dans la nature augmente certainement la vitesse de destruction de la nature et des délicats équilibres écologiques nécessaires à notre existence. Nous avons incroyablement accéléré la vitesse à laquelle la biosphère se transforme en un environnement totalement artificiel, géré anarchiquement par des intérêts commerciaux. Nous remplaçons systématiquement la nature à un rythme sans précédent par des fermes dont les caractéristiques biologiques sont programmées pour satisfaire des besoins égoïstes, nous pourrions l'appeler le *jardin humanisé*. Les chances que les choses s'améliorent pour l'humanité sont en effet très faibles, mais en l'état actuel des choses, il est difficile d'imaginer que nous puissions arrêter cette course vers un monde artificiel, non naturel et donc moins résilient. Nous violons les règles fondamentales de l'évolution avec superficialité et vanité, en simplifiant la nature et en contaminant de manière irréversible la biodiversité de la planète. En outre, les inégalités ne peuvent que s'accroître.

Le remplacement des environnements naturels par des fermes humanisées, dans lesquelles même les humains sont le résultat d'un projet évolutif autogéré, est une idée folle et effrayante. De ce point de vue, la réduction de la biodiversité s'accélère de façon spectaculaire, entraînant des changements irréversibles : une moindre capacité à résister aux changements et une plus grande sensibilité aux maladies, notamment génétiques. Le remplacement de la procréation et de

la sélection naturelle par des biotechnologies régies par des règles économiques et des rêves impossibles, comme celui d'individus désirables (ou parfaits), est un projet effrayant.

LES COUTUMES QUI NUISENT À L'APICULTURE ET À L'AGRICULTURE

L'AGRICULTURE INDUSTRIELLE ENTRAÎNE UN MANQUE DE NUTRIMENTS POUR LES POLLINISATEURS

Le paysage agricole actuel, notamment dans les plaines comme la vallée du Pô, est un véritable désert pour les abeilles, mais aussi pour d'autres animaux comme les oiseaux, car il manque de nutriments. En France, entre 1960 et 1990, 60% des haies, des arbres sauvages et des zones non cultivées entre les champs ont été remplacés par des cultures peu intéressantes pour les abeilles, comme les graminées (le maïs est visité pour son pollen).²⁴³ On sait depuis plus de 50 ans que les zones semi-naturelles abritent au moins sept fois plus de pollinisateurs sauvages que les champs cultivés.

L'un des effets de la réduction de la biodiversité est la monotonie alimentaire, c'est-à-dire la réduction de la valeur nutritionnelle disponible pour les insectes pollinisateurs (pollen et nectar). La réduction de la quantité et de la qualité du pollen disponible affaiblit la colonie et les insectes sauvages. Il n'y a pas besoin de preuves scientifiques : si les abeilles souffrent de faim ou de malnutrition, elles sont condamnées à mourir.¹⁶³ La privation forcée de pollen (à l'aide de pièges mécaniques) entraîne divers effets négatifs sur la colonie tels qu'une diminution du poids des bourdons, un retard dans le développement des bourdons, une réduction de la production de sperme et des problèmes de reproduction.¹¹⁷⁹ En revanche, l'alimentation complémentaire améliore les qualités reproductives des mâles.⁹⁹¹

Afin de favoriser la production de miel, il sera bientôt indispensable de cultiver des plantes spécifiques pour fournir le nectar et le pollen nécessaires à la survie des abeilles : l'utilisation d'aliments complémentaires ne pourra pas compenser le manque de fleurs. La dégradation des écosystèmes agricoles et semi-naturels obligera les apiculteurs à cultiver les fleurs nécessaires à la production de miel, sans quoi ce délicieux aliment ne pourra être produit dans les quantités souhaitées.

Les effets négatifs des pesticides sont amplifiés si les abeilles ne peuvent pas se nourrir correctement. Le manque de nutriments importants, dû à la diminution de la disponibilité du pollen, augmente les effets négatifs des pesticides tels que les insecticides (par exemple la clothianidine).¹²³⁶ Comme on peut s'y attendre, la malnutrition, même dans le cas des abeilles, rend l'organisme plus faible et plus sensible aux effets d'autres facteurs négatifs tels que l'exposition aux pesticides ou aux parasites. Pour que les abeilles soient en meilleure santé et plus aptes à résister aux dommages causés par les pesticides, il faut disposer d'une variété adéquate de plantes pour les nourrir de manière suffisante et équilibrée. L'accès à des quantités abondantes et variées de pollen est une condition préalable à la santé des abeilles (la mortalité est réduite).¹²³⁶ Encourager une augmentation de la biodiversité dans nos campagnes améliore la santé des pollinisateurs et aide les agriculteurs.

La monoculture peut signifier de grandes quantités de pollen mais d'une seule qualité et pour une courte période. Le pollen est important en raison de sa teneur en protéines, qui varie d'une espèce à l'autre, et il est important pour la nutrition des stades juvéniles des abeilles. Les colonies d'abeilles qui ont accès à cinq types de pollen, au lieu d'un seul, ont un meilleur apport nutritionnel et seront donc plus résistantes aux maladies (par exemple au champignon *Nosema ceranaea*).²⁴³ Comme on peut s'y attendre, la diversité alimentaire est très importante pour le maintien de la santé de la colonie d'abeilles, tout comme pour l'espèce humaine.

La sélection artificielle de variétés végétales présentant des caractéristiques plus utiles pour l'homme ne tient souvent pas compte de la production de pollen et de nectar, de sorte que l'attrait pour les abeilles peut varier considérablement. L'intensité des visites des abeilles sur les fleurs de différentes variétés de tournesol, de la plus attrayante à la moins attrayante, peut varier d'un facteur quatre.²⁴³

La fauche avant la floraison (par exemple de la luzerne et du trèfle pour produire de l'ensilage) est l'une des pratiques agronomiques qui réduisent la disponibilité de nourriture pour les pollinisateurs. Le fauchage ou le désherbage des fleurs à proximité des vergers réduit également la disponibilité de la nourriture pour les insectes. L'agriculture chimique et industrielle est allée jusqu'à concevoir des mesures préventives non durables telles que le désherbage chimique ou mécanique des zones non cultivées proches des champs cultivés pour éviter d'attirer les abeilles vers les fleurs contaminées par les pesticides distribués dans les vergers.

Les fleurs doivent être constamment présentes dans un rayon de quelques kilomètres, pendant environ 7-8 mois par an. En apiculture, l'absence de milieux dans lesquels différentes floraisons alternent constamment tout au long de l'année est compensée par le nomadisme et l'utilisation de nourriture.

Le pâturage est une pratique d'élevage qui réduit l'approvisionnement en nourriture des abeilles et des insectes pollinisateurs. Le bétail, en plus de réduire l'approvisionnement en nourriture des animaux sauvages, peut endommager les nids du sol, comme ceux des bourdons, en les piétinant.³⁶¹ Le déplacement d'espèces herbivores (bovins, ovins, caprins), étrangères à certains écosystèmes, peut entraîner l'extinction de certains pollinisateurs en détruisant les plantes avec lesquelles ils ont développé des symbioses.⁴⁸¹

En raison de divers facteurs, les abeilles sont contraintes de suivre un régime alimentaire artificiel géré par les apiculteurs. En termes extrêmes, l'apiculture industrielle est une entreprise qui transforme en miel des aliments à base d'eau, de sucres, de protéines, de vitamines et de minéraux (avec le soutien d'insecticides, de fongicides, d'acaricides, d'hormones et parfois d'antibiotiques). Le pollen de riz, la levure de bière, la farine de soja, la farine de tournesol, la farine de sorgho, la poudre de lait, la poudre de caséine, la poudre de jaune d'œuf et la farine de châtaigne peuvent être utilisés comme compléments protéiques.^{35, 974} Plus de 20 kg de sucre par ruche sont également nécessaires lors des saisons difficiles, comme celle de 2017, qui a été caractérisée par une sécheresse intense en Italie.

Le miel est la nourriture naturelle des abeilles, mais il est prélevé à des fins économiques et doit donc être remplacé par des aliments pour animaux, qui doivent nécessairement avoir une valeur économique inférieure afin d'assurer la rentabilité des apiculteurs. Ainsi, l'alimentation peut être nécessaire même lorsque l'approvisionnement en pollen et en nectar est abondant : cela dépend de l'intensité du prélèvement de miel.

L'agriculture industrielle contraint les abeilles à un régime simplifié composé de variétés à pollen unique qui alternent grâce au nomadisme des apiculteurs. Il existe de nombreuses alternatives artificielles aux fleurs. Nous pourrions imaginer l'avenir des élevages d'abeilles dans des serres où le but principal des plantes est de créer un environnement moins étranger et où la plupart des nutriments seront fournis par des fleurs artificielles, qui offrent une nourriture enrichie en vitamines, acides aminés et minéraux. Nous ne serions pas surpris que des intérêts économiques incitent à recycler les abeilles, leurs œufs et leurs larves mortes, sous forme de farine, comme cela se fait dans l'élevage et l'aquaculture.

Il devrait être obligatoire d'enregistrer les aliments (par exemple, les sirops composés de 50% de sucre dans l'eau) donnés aux abeilles. La connaissance des quantités d'aliments utilisées à différentes périodes de l'année pourrait également fournir des informations très utiles pour comprendre les problèmes de santé des colonies. En Italie, la législation exigeait cet enregistrement, mais les apiculteurs ont été exemptés de cette obligation en 2004.^{222, 223} Les apiculteurs peuvent également recycler le miel invendu en le diluant avec de l'eau et du sucre.

Cette pratique pourrait favoriser la propagation de certaines maladies. Il serait utile d'enregistrer non seulement les substances sucrées, mais aussi tous les types d'aliments utilisés, comme les sources de protéines.

Les maladies des abeilles ne sont pas seulement propagées par le nomadisme, mais sont également favorisées par l'importation d'aliments tels que le pollen, qui peuvent contenir des bactéries et des champignons. Par conséquent, le mouvement de cette matière première doit être surveillé de près.

APICULTEURS MIGRATEURS : OPTIMISME AVEUGLE ET SURDITÉ SÉLECTIVE

On trouve des précédents historiques de la pratique de l'apiculture nomade en Égypte à l'époque hellénistique et en Grèce.⁹⁷² Les abeilles sont déplacées pour augmenter la rentabilité de l'apiculture, mais aussi en raison de la réduction importante de la biodiversité florale. Les déplacements sont souvent effectués chaque semaine et sur des centaines de kilomètres, alors que les abeilles domestiques ne pourraient guère parcourir plus de 5-8 km par an. Le nomadisme et le commerce des reines d'abeilles favorisent plusieurs problèmes :

- La propagation de maladies parmi les abeilles d'élevage (par exemple, les acariens et les virus). Les parasites peuvent être déplacés vers des zones géographiques où ils n'existaient pas.
- La propagation des maladies des abeilles d'élevage aux abeilles sauvages. Le déplacement des abeilles d'élevage favorise la propagation des agents pathogènes dans de nouveaux territoires car, dans certains cas, les parasites peuvent facilement les coloniser. Ce problème est plus évident lorsque les abeilles d'élevage sont déplacées hors de leur territoire d'origine.⁴⁸⁶
- La propagation des maladies parmi les plantes.
- L'extinction des phénotypes locaux. Le nomadisme, ainsi que la possibilité d'acheter ces insectes n'importe où sur la planète, favorise le phénomène d'homologation génétique qui éteint les écotypes locaux. Les caractéristiques qui rendent les abeilles uniques et adaptées à des environnements particuliers sont perdues à jamais. Les caractéristiques génotypiques et phénotypiques qui sont importantes et utiles aux apiculteurs eux-mêmes (par exemple, la résistance aux maladies) sont systématiquement perdues.
- La concurrence pour les ressources telles que le pollen, le nectar et les sites de nidification entre les abeilles d'élevage et les abeilles sauvages s'intensifie. La biodiversité sauvage locale est réduite. Les ressources alimentaires sont prélevées sur les espèces sauvages et certains parasites des cultures peuvent être favorisés. Les abeilles prélèvent le pollen de nombreux arthropodes tels que les guêpes, les syrphes, les diptères et les coccinelles, qui remplissent la fonction naturelle de se nourrir des ennemis des cultures (ils ont à la fois des stades carnivores et herbivores, comme c'est le cas de certaines guêpes dont les adultes sont insectivores mais dont les larves se nourrissent de plantes). Dans un écosystème déjà pauvre et fragile, l'arrivée soudaine de pelotons de butineuses, soutenus artificiellement par les apiculteurs, réduit la possibilité naturelle de contenir les ravageurs des cultures. Certains insectes qui en parasitent d'autres ont également besoin de pollen et de nectar pour survivre. La concurrence pour les ressources alimentaires végétales entre les abeilles et les insectes carnivores sauvages peut donc contribuer à réduire un facteur limitant important pour l'agriculture.
- Des changements dans la composition qualitative et quantitative des espèces végétales, tels que l'extinction de certaines plantes indigènes. La réduction de la biodiversité locale

peut entraîner la destruction du réseau d'équilibres tels que les symbioses entre les plantes et les pollinisateurs sauvages. Les abeilles d'élevage, parce qu'elles sont capables de polliniser différentes espèces, sont plus résistantes aux changements dans la composition de la flore sauvage. Ainsi, le nomadisme des abeilles domestiques peut avoir un impact négatif sur la biodiversité végétale locale.⁴⁸⁶

- La fréquence accrue de l'utilisation de médicaments pour traiter les maladies sera plus probable, en raison du nomadisme lui-même. Un effet secondaire est la sélection de souches parasitaires résistantes aux médicaments utilisés (insecticides, acaricides et antibiotiques).

Malheureusement, les informations disponibles sont insuffisantes pour la plupart des questions critiques énumérées ci-dessus, par exemple sur la concurrence pour les ressources alimentaires et la variation qualitative et quantitative des plantes, dans les zones naturelles et à long terme. On dispose d'encore moins d'informations sur les effets générés par l'élevage d'insectes pollinisateurs autres que l'abeille domestique (*Apis mellifera*) et dans certaines régions comme l'Afrique et l'Australie.⁴⁸⁶ La plupart des publications analysées portent sur des contextes européens et nord-américains (l'abeille domestiquée est également une espèce étrangère en Amérique du Nord). En général, les problèmes augmentent lorsque les abeilles domestiques sont déplacées en dehors de leur territoire d'origine (par exemple, de l'Europe vers l'Amérique du Nord).

Le déplacement des troupeaux d'insectes pollinisateurs devrait être limité ou interdit dans les zones présentant un intérêt pour la conservation de la biodiversité. Dans le cas du nomadisme des abeilles domestiques, une zone de sécurité d'au moins 15 km de distance de la limite de la zone et/ou de l'espèce à protéger pourrait être recommandée. Les zones de sécurité et les mesures préventives (par exemple pour le commerce des reines et des colonies d'abeilles) doivent également être réglementées afin de limiter la propagation des maladies parmi les abeilles d'élevage et de celles-ci aux plantes.

LE NOMADISME DES BOURDONS : UNE EXPÉRIENCE DANGEREUSE

Comme l'abeille domestique, les bourdons sont élevés et vendus dans le monde entier pour polliniser des cultures telles que les tomates et les framboises cultivées en serre, les fraises, les myrtilles, la luzerne, les concombres, les aubergines, les haricots, le cassis, les poivrons et les pommes. Ce sont des nids jetables. Ce commerce international d'insectes est nuisible à l'environnement car il génère les mêmes problèmes que ceux causés par le nomadisme de l'abeille domestique. Dans le cas des bourdons, l'hybridation entre le bourdon terrestre et des espèces apparentées mais différentes est bien connue. Les animaux hybrides sont la progéniture d'un âne et d'une jument appelée mule, ou la progéniture d'un âne et d'un étalon appelée hinny ; les zèbres croisés avec des ânes sont appelés zèbres et sont presque toujours stériles.⁸⁴⁸ Les bourdons mâles (*Bombus terrestris*) peuvent s'accoupler avec la femelle *Bombus hypocrita*, qui est originaire du Japon, mais l'accouplement est stérile. On a également observé que les hybridations entre *Bombus terrestris* et les espèces indigènes produisaient une descendance.⁶⁸⁸ Dans ce cas, le désastre environnemental est encore plus grand.

87,5% des plantes sauvages ont besoin de pollinisateurs à des degrés divers et 20% bénéficient de la présence des abeilles.¹²³⁹ Les abeilles comprennent au moins 260 espèces de bourdons qui, comme tous les insectes, sont en déclin. En Europe, au moins 21% des 63 espèces de bourdons et en Amérique du Nord, 26% des 47 espèces classées sont en déclin ou menacées d'extinction.¹²³⁹ Les causes du déclin des bourdons sont nombreuses et, comme pour les abeilles domestiques, les pesticides et la destruction des écosystèmes naturels en sont la principale cause.

La destruction, la fragmentation et la dégradation des habitats dues à l'expansion agricole sont également des causes importantes. Pour certaines espèces, les causes particulières sont bien documentées. Un bourdon originaire d'Argentine (*Bombus dahlbomii*) est en déclin, en partie à cause de l'arrivée du *Bombus terrestris*, qui est une espèce invasive dans cette région.¹²³⁹ Le commerce des bourdons a également causé des problèmes aux populations indigènes en Amérique du Nord, en Chine et au Mexique. Depuis le Chili en 1990, *Bombus terrestris* s'est propagé rapidement (200 km par an) à travers les Andes jusqu'en Argentine, où il est arrivé en 2006. L'expansion du *Bombus terrestris* a été suivie par la disparition du bourdon indigène de l'Argentine (*Bombus dahlbomiio* bourdon géant de Patagonie).⁴⁸¹

Des espèces qui ne se seraient jamais rencontrées dans des conditions artificielles sans le commerce humain d'insectes s'accouplent, mettant en danger la survie des espèces indigènes. Il s'agit d'une expérience dangereuse qui conduit à une réduction de la biodiversité génétique. Le nomadisme des bourdons a favorisé la propagation de maladies parmi les espèces sauvages et l'extinction des bourdons sauvages. Certaines espèces de bourdons sont résistantes au froid et le changement climatique réduit leurs habitats. Par exemple, la zone des Alpes propice au *Bombus alpinus* s'est élevée de plus de 450 mètres depuis 1984 en raison du réchauffement climatique : l'altitude minimale à laquelle ces insectes peuvent vivre augmente et, à terme, ils disparaîtront. En Suisse, entre 50 et 85% des bourdons sont voués à l'extinction en raison du changement climatique. La vulnérabilité à des changements aussi rapides est un aspect crucial. Le changement climatique avec la sécheresse et les fortes pluies modifie la disponibilité florale en réduisant les sources de nourriture.

L'érosion des habitats naturels due à divers facteurs (climat, agriculture) entraîne également la fragmentation et l'isolement des populations qui sont contraintes à un isolement géographique et génétique mortel (par exemple pour *Bombus veteranus* et *Bombus distinguendus*).¹²³⁹

Un autre facteur négatif est la propagation d'agents pathogènes favorisés par le commerce des bourdons et des abeilles utilisés pour la pollinisation en agriculture. Le nomadisme artificiel généré par la symbiose entre agriculteurs et apiculteurs favorise la propagation de nombreuses maladies : *Bombus terrestris* en Amérique du Sud a favorisé la propagation d'un parasite intestinal (*Crithidia bombi*).¹²³⁹ Le parasite *Nosema ceranae* affecte les abeilles domestiques et les bourdons, de sorte que la migration artificielle amplifie considérablement sa propagation. Le commerce de pollinisateurs élevés a favorisé la propagation de maladies virales des abeilles domestiques aux bourdons.

Les bourdons sont élevés pour la pollinisation des cultures en serre telles que les tomates et peuvent transmettre des maladies aux espèces sauvages. La propagation de maladies dues au nomadisme a été enregistrée en Amérique du Nord pour plusieurs parasites des bourdons : *Nosema bombi* (champignon), *Crithidia bombi* (protozoaire), *Locustacarus buchneri* (acarien) et le virus des ailes déformées.³⁶¹

Certains bourdons nuisibles sont également potentiellement très dangereux pour les abeilles domestiques, comme la petite mouche *Apocephalus borealis* qui, en Amérique du Nord, peut transmettre des virus tels que le virus de l'aile déformée et le parasite *Nosema ceranae*.¹¹⁵⁵ La mouche pond ses œufs dans le corps des abeilles, d'où sortent les larves. Des analyses génétiques ont montré que les mouches qui parasitent les bourdons (*Bombus vosnesenskii* et *Bombus melanopygus*) sont les mêmes que celles qui affectent l'abeille domestique (*Apis mellifera*).¹¹⁵⁵

Il n'y a plus de doute : le nomadisme des insectes élevés pour le service de la pollinisation favorise également la propagation de maladies aux espèces sauvages. Les informations à ce sujet sont insuffisantes et le principe de précaution devrait être invoqué. Nous menons donc une expérience non contrôlée. Si nous voulions distribuer rapidement les maladies des bourdons (par exemple les acariens) sur la planète et réduire la diversité génétique, nous ne pouvions pas faire mieux.

Autre aspect alarmant : en Europe, quelques centaines de tonnes de pollen sont nécessaires chaque année pour élever un million de colonies de bourdons. Les éleveurs de bourdons peuvent obtenir cette énorme quantité de pollen en la détournant des abeilles domestiques. Le pollen peut être collecté par les apiculteurs en plaçant des outils mécaniques spéciaux dans les ruches. La vente de pollen peut être une autre source de revenus pour les apiculteurs. Cela crée une condition artificielle dans laquelle l'abeille domestique est élevée pour nourrir une autre espèce, le bourdon terrestre. Ce commerce de pollen prélevé sur l'*Apis mellifera* peut entraîner la transmission de maladies au *Bombus terrestris* (par exemple, le virus de l'aile déformée), qui sont ensuite distribuées sur toute la planète : les maladies peuvent être transmises à d'autres insectes, mais aussi entre les plantes. Cette pratique industrielle génère d'autres dommages environnementaux car les nutriments (pollen et nectar) sont retirés aux pollinisateurs sauvages. Dans certains cas, le pollen est commercialisé sous forme d'aliments conditionnés pour nourrir les colonies en difficulté (non seulement les abeilles domestiques mais aussi les bourdons). Dans 509 échantillons de pollen provenant de 14 pays, 71 familles d'insectes et 27 acariens ont été détectés.⁶⁷⁰

En conclusion, le nomadisme, ainsi que le commerce d'insectes et d'aliments pour animaux, menacent la santé des insectes d'élevage et sauvages et même des plantes.

L'APICULTURE APPAUVRIT LES RESSOURCES ALIMENTAIRES DISPONIBLES POUR LES AUTRES POLLINISATEURS

L'introduction d'abeilles domestiques partout où il y a de l'homme et une culture à polliniser a généré une concurrence pour les ressources telles que le pollen et le nectar. À titre d'exemple, les abeilles européennes ont été introduites en Amérique du Nord en 1620. La concurrence entre les abeilles domestiques et les insectes sauvages indigènes, tels que les bourdons, a entraîné une réduction du succès reproductif de ces derniers.³⁶¹ Il faut savoir qu'un rucher, c'est-à-dire des ruches placées sur un site par un apiculteur industriel, peut être constitué de plus de 50 colonies d'abeilles. Chaque ruche consommera, en un an, entre 9 et 59 kilos de pollen et entre 54 et 408 kilos de nectar.³⁸⁸ Une colonie avec une population maximale de 50.000 abeilles peut consommer plus de 120 kg de miel en un an, ce qui n'est nécessaire que pour la survie des abeilles adultes. Globalement, la colonie entière peut consommer plus de 200 kg de nectar et entre 10 et 30 kg de pollen par an.⁹⁷² Une colonie de cette taille peut rapporter à l'apiculteur entre 20 et 40 kg de miel par an (une partie au moins de cette production provient d'un aliment sucré fourni par l'apiculteur plutôt que du nectar ; certains apiculteurs interrogés dans le Piémont en 2020 affirment fournir à leurs ruches au moins 30 kg d'aliment par an, composé de 50% de sucre et 50% d'eau, avant l'arrivée de l'hiver).

Les colonies naturelles d'*Apis mellifera* en Europe n'existent probablement plus, mais on peut supposer que leur densité naturelle se situe entre moins d'une et quelques colonies par 100 hectares (cette densité est celle de certaines abeilles sauvages à la biologie similaire).⁹⁷² Les densités artificielles gérées par les apiculteurs peuvent être deux ou trois ordres de grandeur plus élevés, allant de plus de 500 colonies par 100 hectares à moins de 10.

Le déplacement d'un grand nombre de colonies dans une zone naturelle ou dans une zone où résident des espèces sauvages génère une concurrence considérable pour les ressources alimentaires disponibles. Un rucher de 40 colonies consommera probablement le pollen nécessaire à 4 millions d'abeilles sauvages (en trois mois). Dans les fleurs, le pollen, contrairement au nectar, n'est pas continuellement renouvelé, de sorte que le nombre d'insectes par nombre de fleurs est très déterminant pour la possibilité de survie. Malheureusement, il n'y a

pas beaucoup d'informations sur les effets à long terme générés par cette compétition artificielle soutenue par les apiculteurs, mais il est facile de prédire la réduction de la biodiversité.

La concurrence entre les pollinisateurs sauvages et les abeilles est un aspect qu'il pourrait être intéressant d'explorer davantage. Sur cette question et sur les problèmes générés par le nomadisme tels que la propagation d'agents pathogènes, la concurrence pour les ressources, la consanguinité qui réduit la biodiversité et la variation qualitative et quantitative de la flore (par exemple, l'extinction d'espèces indigènes), les informations disponibles sont rares et fragmentaires.^{388, 486}

Les abeilles solitaires ne vivent pas en groupe, se nourrissent principalement de pollen et peuvent avoir un régime alimentaire différent selon leur âge et leur sexe. Le nomadisme des abeilles domestiques génère une présence soudaine et massive de centaines de ruches, qui s'approvisionnent en ressources limitées et utiles aux autres espèces. Certes, les abeilles, suite à l'aide de l'homme, deviennent de redoutables concurrentes capables de nuire aux pollinisateurs sauvages, car elles les priveront des ressources alimentaires nécessaires.

Il est possible d'estimer le nombre maximum d'individus pouvant être nourris (par exemple, larves et adultes), en se basant sur le nombre de fleurs par unité de surface ; le nombre de fleurs peut être inférieur à 10 fleurs/m² pour le tournesol, supérieur à 50 fleurs/m² pour le trèfle et supérieur à 11.000 fleurs/m² pour le colza (*Brassica napus*).¹³ La corrélation entre le nombre maximum d'insectes qui peuvent survivre et la quantité de pollen produite par unité de surface est peut-être encore plus directe. Les plantes, dans l'intention de favoriser une plus grande dissémination, libèrent le pollen progressivement de sorte qu'elles doivent être visitées plusieurs fois avant d'avoir libéré tous les grains de pollen aux insectes. La disponibilité des nutriments pendant les différents mois de l'année, et pas seulement pendant les 2 ou 3 semaines de la floraison de la monoculture, est également importante. Un aspect critique est la monotonie alimentaire à laquelle sont exposés les insectes pollinisateurs, qui, pour les abeilles domestiques, est partiellement compensée par l'alimentation artificielle des apiculteurs et le nomadisme (un investissement énergétique non durable sur le plan environnemental).

Les pollinisateurs sauvages, tels que certaines abeilles solitaires, construisent leur nid dans le bois ou le sol. L'absence d'arbres et le travail du sol empêchent donc l'achèvement du cycle de vie. Un impact négatif majeur pour les espèces sauvages est la fragmentation des terres agricoles, qui les oblige à parcourir de plus grandes distances pour trouver des haies et des zones de floraison. En outre, les obstacles à la circulation augmentent. Les insectes, comme tous les êtres vivants, doivent faire face à l'efficacité énergétique : une fois certaines distances dépassées, qui dans de nombreux cas peuvent être de l'ordre de centaines de mètres ou de quelques kilomètres, la probabilité de succès de la reproduction diminue de manière décisive et irréversible. Il est possible d'estimer la distance au-delà de laquelle la probabilité de revenir nourrir les larves est réduite de 50% ou de 90%, ou d'estimer le temps de vol maximal, qui peut varier entre 3 minutes et 170 minutes pour des insectes d'une taille comprise entre 7 et 12 mm. Après une certaine distance ou un certain temps de vol, si le pollen et/ou le nectar nécessaires n'ont pas été collectés, la mort par inanition devient inévitable. Tous ces facteurs pourraient donc être approfondis afin d'aider le système agricole à régénérer un nouvel équilibre, plus durable et soutenable.

QUELQUES ENNEMIS IMPORTANTS DES ABEILLES

La propagation des maladies est favorisée par des facteurs tels que le nomadisme, l'utilisation de pesticides, la sélection artificielle et d'autres activités apicoles, et constitue un problème croissant. Les pratiques apicoles qui favorisent la propagation des maladies sont notamment le commerce des reines d'abeilles (elles sont généralement expédiées avec un petit groupe d'ouvrières) et le regroupement de familles d'abeilles pour renforcer les colonies faibles. D'autres activités qui favorisent la propagation des maladies sont la collecte des essaims, le transfert de matériaux comme les rayons et les feuilles de cire entre les ruches, et les équipements comme l'enfumeur ou l'extracteur. La principale cause de la propagation des bactéries et de leurs spores est précisément l'apiculture. Selon certains chercheurs, le commerce des pollinisateurs pourrait être la principale cause de la propagation de certaines maladies chez les bourdons sauvages. L'importation de bourdons pour la pollinisation des serres au Canada a entraîné la propagation d'un agent pathogène chez les espèces sauvages (*Crithidia bombi*).⁴⁴² La répartition des maladies des abeilles (et des animaux) dans le monde peut être consultée sur le site de l'Organisation mondiale de la santé animale.⁶⁷¹ Cette organisation surveille principalement la propagation de six agents pathogènes de l'abeille : l'*acarapisose*, la loque américaine (*Paenibacillus larvae*), la loque européenne (*Melissococcus plutonius*), *Aethina tumida*, *Tropilaelaps* et *Varroa*. Certaines de ces maladies peuvent être très résistantes. Par exemple, les spores de la bactérie responsable de la loque américaine (*Paenibacillus larvae*) peuvent rester dans l'environnement, résistant à la chaleur et au froid, jusqu'à 35 ans, tandis que les spores du champignon *Acarapisosis* peuvent rester actives pendant 15 ans (par exemple dans la cire, le miel et le pollen) et le champignon parasite (*Nosema ceranea*) peut rester actif dans la cire pendant un an.^{670, 744} Une larve d'abeille peut être infectée en ingérant moins de 10 spores de *Paenibacillus larvae*, mais une puppe morte peut libérer 2,5 millions de spores, générant la propagation rapide de la maladie bactérienne dans la ruche.⁹⁷⁴

Les pratiques apicoles sont l'une des principales causes de la propagation de certaines maladies à travers la planète. Le champignon qui affecte les voies respiratoires et se nourrit de l'hémolymphe des abeilles (*acarapisose*) peut être transporté par les reines d'abeilles qui sont échangées entre différents continents, en utilisant des services postaux rapides (elles peuvent voyager en avion).⁶⁷⁰ Le commerce de colonies ou de reines d'abeilles implique une règle de prévention vétérinaire bien établie, qui exige la vérification de l'absence de rapports de maladies pendant au moins les six mois précédents dans la zone d'où proviennent les insectes et dans un rayon d'au moins 100 km (il s'agit d'une mesure de sécurité pour éviter la propagation des parasites). Par exemple, le coléoptère parasite *Aethina tumida* peut voler et se déplacer activement jusqu'à 13 km des colonies d'abeilles infectées et peut également parasiter les bourdons (*Bombus terrestris*).⁶⁷⁰ Les insectes adultes peuvent vivre plusieurs mois et le stade de la nymphe se déroule dans le sol, à quelques dizaines de mètres de la ruche.

Le miel est principalement destiné à la consommation humaine, mais il peut être utilisé pour nourrir les abeilles dans des conditions difficiles. Le miel peut également être un vecteur de maladies, telles que celles causées par la loque américaine et européenne. On peut trouver jusqu'à 600.000 spores de la bactérie de la loque américaine *Paenibacillus larvae* dans 5 grammes de miel.⁶⁷⁰ Les larves d'abeilles, qui sont échangées par les apiculteurs pour aider les colonies faibles, peuvent transmettre des maladies telles que certains virus ou la loque européenne (par le biais de spores).

Une pratique sanitaire très importante est la destruction des colonies infectées pour réduire la probabilité de propagation de la maladie. Toutefois, une action préventive doit être menée dans un rayon d'au moins quelques kilomètres, pas moins de trois : toutes les ruches qui se trouvent à moins de trois kilomètres de colonies définitivement malades doivent être

détruites. Cette action sanitaire préventive n'est pas à la portée des apiculteurs, qui peuvent refuser de signaler la présence de colonies infectées aux autorités sanitaires, comme l'exige la législation vétérinaire. Pour encourager cette stratégie préventive, une aide financière pourrait être accordée pour compenser au moins une partie des pertes (par exemple, une indemnisation pour la destruction des ruches due à la présence de la peste, c'est-à-dire de la bactérie *Melissococcus plutonius*).

L'une des pratiques artificielles mises en œuvre par les agriculteurs est la collecte et la commercialisation du sperme des bourdons à des fins de fertilisation assistée. Il est prouvé que le liquide contenant le sperme peut être porteur de certains virus. Dans la nature, une reine des abeilles peut s'accoupler avec jusqu'à 28 mâles pendant son vol nuptial, et peut donc recevoir des virus dangereux de différentes colonies.

Lors du commerce, une mesure préventive est ce qu'on appelle la quarantaine, c'est-à-dire que pendant un certain temps, le matériel qui risque de propager des agents pathogènes est soumis à une isolation, une observation et une analyse pour déterminer l'apparition probable de la maladie. Dans certains cas, il est nécessaire d'effectuer une désinfestation avec des substances spéciales (par exemple, de l'hypochlorite de sodium à 1% pendant 30 minutes pour les équipements à risque) ou il suffit de soumettre le matériel à de basses températures : par exemple, dans les rayons, une température de -12°C, maintenue pendant au moins 24 heures, est en mesure de réduire le risque de propagation du coléoptère de la ruche (*Aethina tumida*).⁶⁷⁰ Ce petit coléoptère (*Aethina tumida*) est originaire d'Afrique du Sud et peut causer des dommages aux rayons, des pertes de miel et de pollen, et même la conséquence extrême de la perte de la colonie.⁶⁷² Si l'infestation atteint des proportions considérables, elle peut provoquer un essaimage. En outre, il peut endommager les rayons stockés et le miel non transformé. Les larves creusent des tunnels dans les rayons où elles mangent et défèquent, ce qui fait fermenter le miel.

Le coléoptère *Aethina tumida* a atteint les Etats-Unis après 1996, en 1998 il a été enregistré en Floride, en 2002 il est arrivé au Canada et en Australie, en 2004 au Portugal et en 2014 en Italie.²⁴³ La vitesse de propagation de cet insecte parasite a été facilitée par le commerce des abeilles et de leurs produits (cire, pollen), même s'il est capable de voler sur environ 5 km. Les abeilles sauvages sont capables de le combattre en le piégeant dans la propolis ou en adoptant un comportement tel que l'abandon de la colonie infestée.²⁴³ On a essayé de le combattre avec les armes chimiques habituelles (coumaphos, fipronil, perméthrine) ainsi qu'avec des nématodes entomopathogènes (lutte biologique).²¹⁸

Parmi les maladies propagées par le nomadisme et d'autres pratiques telles que le commerce des reines d'abeilles figure le champignon parasite intestinal *Nosema ceranae*, apparu en Europe en 2005.²³⁰ Aux Etats-Unis, il a probablement été enregistré pour la première fois en 1987, en Floride. La seule région de la planète encore probablement exempte de cet acarien est l'Australie, de sorte qu'en quelques années, il a colonisé les abeilles de toute la planète.³⁰⁷ Un suivi réalisé en Italie sur plus de 1.300 ruches en 2009 et 2010 a permis d'enregistrer des parasites dangereux pour les abeilles avec des fréquences inquiétantes : *Nosema ceranae* dans 49,5% (entre 30% et 69% des colonies dans les différentes régions d'Italie) et des virus dans 75% des colonies.¹⁶³ Dans les autres pays, les fréquences de *Nosema ceranae* étaient les suivantes : Belgique 92,6%, Espagne 65,6%, Allemagne entre 5,2% et 35,4%.

Le premier rapport officiel de la présence de l'acarien *Varroa destructor* sur les abeilles européennes (*Apis mellifera*) a probablement été fait en Chine en 1958 et en Italie en 1981.³⁵ L'acarien *Varroa* est probablement passé de l'abeille asiatique à l'abeille européenne exportée en Asie dans les années 1960 et est arrivé en Europe dans les années 1980.²³⁰ L'acarien *Varroa* favorise la propagation de virus chez les abeilles (au moins 18 types de virus sont connus pour nuire aux abeilles). Les virus peuvent également être transmis par l'alimentation, par exemple

par l'administration de gelée royale, que les glandes des jeunes ouvrières produisent pour nourrir la reine des abeilles.

Diverses molécules chimiques sont utilisées pour combattre des maladies telles que le *Varroa* et d'autres acariens. Certains parasites, comme l'acarien *Varroa*, ont développé ces dernières années des souches résistantes aux pesticides utilisés par les apiculteurs.

L'acarien femelle adulte est un ecto-parasite, il suce l'hémolymph des adultes en se positionnant sur le thorax et est également capable d'endommager le couvain. Curieusement, ces acariens sont aveugles, les mâles ne vivent que quelques jours et ne prennent pas de nourriture, la bouche servant à transférer les spermatozoïdes dans l'appareil génital féminin. Certaines abeilles (par exemple *Apis cerana*) ont développé des comportements défensifs tels que la localisation et l'élimination du contenu des cellules parasitées, l'auto-nettoyage ou le fait de laisser les autres abeilles se débarrasser des parasites (toiletage). Ces activités sont probablement induites par des substances chimiques produites par les acariens. Les apiculteurs ont appris à saupoudrer le corps des abeilles de poudres telles que le sucre glace pour les encourager à se nettoyer et à se nettoyer entre elles. La distribution de poudres sur le corps permet de doser les pesticides microencapsulés.⁸⁶⁵

Il est possible de mesurer la densité d'acariens présents dans un certain nombre d'abeilles afin de quantifier la gravité de l'infestation. De cette manière, il est possible d'évaluer les seuils économiques en dessous desquels l'infestation n'est pas si grave et l'intervention peut être évitée (par exemple : 2 acariens pour 100 abeilles examinées au printemps).³⁵

Le *Vespa velutina* ou frelon asiatique (également connu sous le nom de frelon à pattes jaunes) est un hyménoptère originaire d'Asie du Sud-Est. Cette espèce est probablement arrivée en Europe avant 2004 en France et de là s'est répandue dans d'autres pays comme l'Espagne (en 2010) et l'Italie (en 2012). En Europe, elle s'est déplacée à un rythme de 100 km par an (cette guêpe peut encore voler 30 km en une journée et une femelle peut produire 550 futures reines au cours d'une année).¹³ Il est équipé d'un dard qui peut également être utilisé contre les humains et les abeilles sont une nourriture bienvenue. Cette guêpe forme des colonies qui peuvent contenir plus de 6.000 individus. Les espèces d'abeilles du sud-est asiatique (par exemple *Apis cerrana*) ont adopté des comportements efficaces pour combattre ce prédateur, comme le fait de s'empiler sur l'intrus, le surchauffant au point de le tuer par choc thermique. Ce comportement est jusqu'à présent inconnu des abeilles européennes. En fait, les abeilles européennes qui ont été élevées pendant 50 ans en Asie ont adopté un comportement similaire mais moins efficace, car moins d'abeilles sont concernées.^{35, 150}

Le frelon asiatique peut former des colonies annuelles de quelques milliers d'individus et forme des nids de 40 à 60 cm de diamètre. Il peut s'attaquer à d'autres insectes en vol et se nourrit préférentiellement des muscles de vol du thorax. Les adultes de cette guêpe nourrissent les formes juvéniles d'autres insectes, mais ils sont aussi des pollinisateurs. Dans un environnement artificiel, c'est-à-dire lorsque les sources de nourriture sont rares, les abeilles domestiques peuvent constituer 70% de leurs proies. Les guêpes se positionnent près des ruches, s'attaquant aux abeilles qui reviennent. En présence de ce prédateur, les abeilles domestiques peuvent interrompre leur recherche de nourriture, ce qui affaiblit la colonie. Il suffit de cinq de ces frelons pour condamner une ruche. Le *Vespa velutina* constitue également une menace pour d'autres insectes tels que certains pollinisateurs sauvages, réduisant ainsi la probabilité de survie des fleurs.

L'APICULTURE MODERNE FAVORISE LA PROPAGATION DES MALADIES

Une forte densité de ruchers entraîne également des problèmes parmi les abeilles elles-mêmes, car les maladies se propagent plus facilement (par exemple, le *Varroa destructor* et les virus transmis par ces acariens) et elles se font concurrence. Il est bien connu que l'augmentation de la densité des ruchers diminue leur solidité, augmente la mortalité hivernale et réduit la production de miel.⁷⁷¹ Une densité de ruches qui pourrait être considérée comme naturelle se situe entre une et six colonies par kilomètre carré, c'est-à-dire pour 100 hectares. La densité que peut atteindre l'apiculture industrielle peut être supérieure à 4-5 colonies par hectare, soit plus de 500 colonies par kilomètre carré (un rucher peut également abriter plus de 50 ruches, qui seront alors positionnées à quelques centimètres les unes des autres) : l'habitude en apiculture est de placer des dizaines de ruches en ligne les unes à côté des autres. Les rassemblements artificiels ne peuvent exister que grâce au soutien des apiculteurs : nourriture, médicaments, nomadisme (elles se déplacent sur des pneus), remplacement rapide de colonies entières ou de la reine des abeilles (elle peut voyager en avion). La densité exploitée par les entrepreneurs est des centaines de fois supérieure à ce qui pourrait être considéré comme naturel. Cela entraîne une surpopulation et une concurrence, ce qui est préjudiciable à l'apiculteur lui-même.

Chez les abeilles, il est bien connu qu'une butineuse et un faux-bourdon peuvent tous deux être acceptés dans une colonie autre que celle dont ils proviennent : les abeilles ouvrières sont plus facilement acceptées si elles sont chargées de pollen ou de nectar.

La façon dont les ruches sont placées sur un même site peut influencer la santé des abeilles. En disposant les ruches en cercle, avec les entrées tournées vers l'extérieur et distantes de 10 m, on peut espérer obtenir plus de miel, enregistrer moins de maladies (*Varroa destructor*), les abeilles entreront moins souvent dans la mauvaise ruche, par rapport au même nombre de colonies placées en ligne à un mètre de distance.⁷⁷¹ Toutefois, cela ne peut être la solution.

La dérive des abeilles est un autre phénomène qui a plus de chances de se produire entre des ruches voisines, comme cela se produit dans les ruchers nomades. Les abeilles se déplacent d'une colonie à l'autre, pouvant ainsi propager des agents pathogènes tels que des bactéries (la peste) et d'autres maladies. L'exploitation économique de l'apiculture implique que des centaines de ruches soient gérées dans des zones limitées et qu'elles soient en contact étroit les unes avec les autres. Les facteurs qui peuvent favoriser la propagation des maladies (par exemple les acariens) sont le pillage des colonies les plus faibles par les abeilles elles-mêmes et le déplacement des faux-bourdons (abeilles mâles), qui sont également acceptés par d'autres colonies pendant la saison des amours. Le pillage peut être latent, un petit nombre d'abeilles, un peu à la fois, prenant le miel de la colonie la plus faible. Dans certains cas, le pillage peut être très dévastateur et sanglant, car les abeilles s'entretuent.

Les conditions apicoles artificielles réduisent les comportements agressifs entre les colonies pour plusieurs raisons :

- Les butineuses visitent les mêmes fleurs et donc les odeurs dans les colonies seront similaires ;
- Les odeurs ont une composante génétique et les abeilles élevées sont très semblables les unes aux autres, de sorte que les différences chimiques sont également très faibles.

La présence d'importantes réserves de nourriture, facilitée par le nourrissage artificiel (eau et sucre fournis par les apiculteurs), rend les colonies plus dociles et réduit les déséquilibres dans la force des colonies. Une pratique apicole consiste à équilibrer la force des colonies en prenant des cadres d'une ruche plus grande et en les plaçant dans une colonie plus faible. Ainsi, l'élevage intensif augmente les possibilités de tolérance des intrus et entre voisins. Cette condition favorise les contacts physiques entre les différentes colonies et, par conséquent, la propagation des maladies.

La migration qui a lieu dans les vergers d'amandiers de Californie en est un bon exemple. Pour assurer la production d'amandes dans l'une des plus importantes régions amandicoles du monde, il faut entre 1,3 et 2,5 millions de ruches, ce qui représente plus de 50% des colonies aux États-Unis.¹³ Pratiquement toutes les abeilles américaines se rencontrent dans ces amandiers. Il s'agit d'une migration massive très rentable, puisque les apiculteurs peuvent recevoir jusqu'à 160 € par ruche (pour un service de quelques semaines, le temps de la floraison).¹⁹⁶ La proximité de millions d'abeilles, qui sont constamment déplacées, a certainement des effets négatifs prévisibles. Outre la propagation de maladies (par exemple *Aethina tumida*) entre les colonies, les abeilles peuvent également transmettre des maladies à d'autres espèces d'insectes comme les bourdons, qui sont des espèces indigènes dans certains pays.³⁶¹ Par exemple, en Amérique du Nord, où les abeilles ont été introduites après 1620, on a recensé au moins 3.600 espèces d'abeilles indigènes : il est difficile de déterminer combien de ces espèces indigènes ont été endommagées par l'introduction d'abeilles étrangères et dans quelle mesure.³⁸⁸ Il existe peu d'informations sur la possibilité de propagation de maladies des abeilles à d'autres insectes, mais des problèmes ont déjà été signalés pour d'autres pollinisateurs à cause des abeilles domestiques : par exemple, à la suite de la propagation de virus tels que les ailes déformées.⁴⁸¹ Les parasites s'adaptent, ils évoluent, et il a déjà été constaté que le parasite *Nosema ceranae* est passé des abeilles domestiques aux bourdons en Amérique du Sud.³⁸⁸ Cela peut également se produire dans l'autre sens, c'est-à-dire que les abeilles domestiques reçoivent un parasite d'un habitat particulier et le distribuent ensuite ailleurs, comme cela s'est déjà produit. Grâce au nomadisme et au commerce des reines d'abeilles, certains parasites ont fait le tour du monde en quelques années avec des conséquences catastrophiques (par exemple les acariens). Le nomadisme a favorisé la propagation mondiale de l'acarien *Varroa destructor*, qui était initialement présent en Asie et parasitait *Apis ceranea*.⁴⁸³ Le déplacement de ce parasite sur *Apis mellifera* a également favorisé la transmission de certaines maladies comme le virus de l'aile déformée. Un autre parasite important, le champignon intestinal *Nosema ceranea*, s'est également propagé de l'abeille asiatique (*Apis ceranea*) à l'abeille européenne (*Apis mellifera*) par le biais du commerce international et du nomadisme. Le champignon parasite (*Nosema ceranea*) a été signalé aux États-Unis en 1995 et en Europe en 1998 (les spores sont transmises par ingestion).^{483, 670} Ce champignon affecte également les bourdons sauvages.⁴⁸³ *Nosema ceranea* peut affaiblir le système immunitaire des abeilles domestiques, réduire leur espérance de vie et modifier le comportement des ouvrières. La présence de ces parasites dans les colonies d'abeilles augmente la sensibilité aux pesticides. Les doses nécessaires pour manifester des effets létaux ou sublétaux (par exemple le fipronil ou les néonicotinoïdes tels que le thiaclopride) sont réduites en présence de parasites tels que *Nosema ceranea*.⁴⁸³ Certains pesticides (par exemple l'imidaclopride ou le fipronil) réduisent la capacité de défense immunitaire des abeilles en favorisant les parasites. Ainsi, de nouvelles synergies sont créées entre certains organismes nuisibles et les pesticides, ce qui génère des effets négatifs qui se renforcent mutuellement.

Le nomadisme peut favoriser la propagation de maladies parmi les plantes.⁴⁸³ *Erwinia amylovora* est une bactérie (Gram-négatif de la famille des Enterobacteriaceae) qui est l'agent de la maladie végétale connue sous le nom de *feu bactérien des fruits à pépins*. Cette maladie touche plus de 200 espèces appartenant à 40 genres de la famille des Rosaceae, dont de nombreuses espèces de grande importance économique (pommier, poirier, néflier du Japon, cognassier, sorbier), des espèces ornementales (aubépine) et d'autres espèces comme l'acacia.^{17.}¹⁸ Plus de 70 genres d'insectes ont été décrits comme vecteurs d'*Erwinia amylovora*, parmi lesquels les abeilles et les guêpes sont les plus importants.

Un autre aspect concerne l'utilisation de la cire, qui est régulièrement recyclée. La cire peut contenir 100 à 1.000 fois la quantité de pesticides présents dans le miel.²³⁰ Afin d'obtenir plus de miel, les apiculteurs recyclent la cire afin que les insectes dépensent moins d'énergie

pour constituer cette ressource. Malheureusement, la cire accumule et stocke des molécules dangereuses, comme les pesticides utilisés par les apiculteurs et les agriculteurs. Les effets synergiques et additifs sont amplifiés. Cet effet peut également être observé dans la cire achetée par les apiculteurs qui adoptent les critères de l'agriculture biologique certifiée et amplifie le phénomène de bioaccumulation.²⁴⁰ Afin de réduire ce problème, les apiculteurs qui traitent la cire et reconstruisent les feuilles de cellules pour les insérer dans les ruches utilisent des procédures telles que le filtrage au charbon actif et le lavage à l'acide. Ces procédés sont coûteux, ajoutent d'autres facteurs de risque potentiels et ne résolvent pas le problème de la contamination chimique.²³⁰ D'autres substances (par exemple, la paraffine) sont également utilisées lors du recyclage et peuvent avoir des effets négatifs. Enfin, la récupération de la cire peut faciliter la propagation des maladies. L'apiculture durable ne doit pas recycler la cire qui, entre autres, peut provenir de ruches situées à des milliers de kilomètres.

Un aspect crucial de l'apiculture durable devrait être le nomadisme. Les trajets qui durent toute la nuit ou plusieurs jours dans les camions affaiblissent certainement les abeilles et favorisent les effets déjà mentionnés.

LIMITER LE NOMADISME

Le système de règles sur le mouvement des insectes pollinisateurs d'élevage (tels que les abeilles et les bourdons) et des plantes, qui a été conçu selon des principes anthropocentriques, ne permet pas une protection adéquate contre la propagation des maladies. La législation et les usages permettent de placer des groupes de 50 ruches (appelés ruchers) à 200 m les uns des autres.²²² Cette distance n'est pas suffisante pour empêcher la propagation de la maladie entre les colonies. Aucune distance minimale n'est réglementée entre les ruchers et les zones naturelles, où sont présentes des espèces présentant un intérêt naturel particulier (par exemple, des insectes sauvages), ni entre les ruchers eux-mêmes. Certaines directives proposent de placer les ruchers à plus de 6 km les uns des autres, mais pour s'assurer qu'ils ne rencontrent pas les abeilles d'autres ruchers ou qu'ils ne butinent pas les mêmes fleurs, cette distance doit être plus que doublée.³⁸⁸

Par exemple, l'acarien femelle (*Varroa*) est transporté des abeilles adultes vers les larves, où il se reproduit (*Varroa* peut vivre pendant deux mois). En plus de nuire aux abeilles en aspirant leur hémolymphe, l'acarien propage également des maladies telles que des virus. Parmi les meilleurs propagateurs de *Varroa* figurent les bourdons, qui, pendant la saison de reproduction, sont également acceptés et nourris dans d'autres colonies que la leur. Il existe des souches d'abeilles qui sont naturellement résistantes à cet acarien et des acariens qui sont devenus tolérants aux insecticides utilisés par les apiculteurs. En France, la première population de *varroas* à devenir résistante au fluvalinate (insecticide pyréthroïde) a probablement été enregistrée en 1995.²⁴³

En conclusion, il est important de se rappeler que 85% de toutes les plantes à fleurs dépendent de la pollinisation par les animaux. La protection des pollinisateurs sauvages doit donc être assurée afin de sauvegarder la communauté végétale qui est essentielle à notre survie.³⁸⁸ Au moins 15.000 à 20.000 plantes à fleurs ont besoin de pollinisateurs autres que les abeilles. On peut dire que le déplacement d'armées d'abeilles, partout et sans limite, nuit aux pollinisateurs sauvages et aux plantes avec lesquelles ils ont évolué. Nous ne sommes pas en mesure de quantifier précisément les effets générés par le nomadisme et la compétition artificielle, mais l'application du principe de précaution permettra de limiter les dégâts : ne pas déplacer les abeilles à proximité de zones où se trouvent des espèces sauvages d'intérêt, du moins jusqu'à ce qu'il soit prouvé que cette opération est neutre sur les équilibres naturels. En outre, le nombre de ruches par unité de surface doit être limité en fonction de critères tels que la disponibilité des

ressources et la présence de concurrents sauvages. Certaines limites à partager, afin de réduire les problèmes générés par le nomadisme pour les insectes élevés, sont les suivantes :

- L'établissement de zones de sécurité dans lesquelles il ne devrait pas être possible d'élever des insectes. Dans ces zones, l'apiculture et l'utilisation de pollinisateurs commerciaux devraient être interdites. Ces zones pourraient être établies autour de régions à protéger en raison de l'importance de la biodiversité ou pour empêcher la propagation de maladies à partir de régions où leur existence est connue. Des zones de sécurité pourraient être établies autour de toutes les zones géographiques homogènes en termes de type d'écosystème afin d'éviter les échanges dangereux et la contamination. Les zones de sécurité pourraient contribuer à la sauvegarde d'écotypes d'abeilles uniques.
- Le commerce des insectes doit être national ou régional. Il faut éviter les déplacements entre les différentes régions et encore plus entre les pays. Les insectes nécessaires pour répondre aux besoins des cultures doivent être élevés localement.
- La sélection d'insectes pour la pollinisation des cultures doit être effectuée de préférence en utilisant des espèces locales et des races indigènes.
- Le commerce et le nomadisme des insectes élevés doivent être évités dans tous les cas où l'on sait qu'ils peuvent générer des problèmes d'hybridation avec les espèces sauvages.
- Les pollinisateurs sauvages sont en concurrence avec les pollinisateurs d'élevage pour les ressources. Il convient donc de limiter et de gérer le nombre de colonies par unité de surface en veillant à la disponibilité de nourriture pour les animaux sauvages : en l'occurrence, du pollen et du nectar pour les insectes sauvages.
- L'apiculture durable, en vue de sauvegarder la biodiversité des abeilles, devrait limiter le commerce des essaims et des reines, en particulier dans les régions où il est prouvé qu'il existe des souches adaptées à des conditions particulières. L'importation d'abeilles reproduites et sélectionnées par l'homme entraîne une réduction très dangereuse de la biodiversité.

Ces mesures de confinement et de prévention sont nécessaires pour assurer la durabilité et la santé de l'élevage d'insectes également. Si les insectes continuent à être échangés et déplacés sans considération sérieuse, les apiculteurs et les éleveurs d'insectes utiles subiront également de graves pertes économiques. Un mécanisme d'auto-amplification et d'autodestruction s'est mis en marche : les abeilles domestiques sont élevées et leur pollen est prélevé dans leurs colonies et échangé pour élever des bourdons, qui sont à leur tour déplacés pour polliniser les cultures et meurent en quelques semaines. Le miel est également prélevé des abeilles à miel. Les colonies d'abeilles doivent recevoir de la nourriture pour compenser le manque de pollen et de miel. Ce commerce se fait entre les continents avec tous les problèmes que cela comporte, notamment les coûts énormes. Compte tenu de tous les coûts, consacrer entre 10 et 20% de la surface agricole à des zones semi-naturelles et adopter les principes de l'agriculture écologique pour assurer la survie des insectes sauvages est certainement moins cher en comparaison. Si l'on continue à s'en remettre aux règles du marché et aux règles financières pour la pollinisation, le nombre de pollinisateurs sauvages va diminuer et il n'est pas certain que les insectes d'élevage soient en mesure de combler ce déficit. Aujourd'hui déjà, la demande de pollinisation dépasse l'offre. Si nous croyons que nous pouvons remplacer les services gratuits fournis par la nature par les règles du marché, c'est-à-dire par le commerce, nous risquons de mettre en faillite la production agricole qui a besoin des insectes pollinisateurs. Il faut investir dans des solutions plus écologiques et moins coûteuses avant qu'il ne soit trop tard. Les espèces utilisées jusqu'à présent pour polliniser les cultures sont peu nombreuses et leur biodiversité est insuffisante pour offrir des garanties de bonne adaptabilité et de survie dans le temps (la résilience est en constante diminution). Les insectes et les fleurs sauvages sont la police d'assurance de l'agriculture pour les années à venir.

Essayer de discuter des problèmes générés par le commerce des insectes, la sélection artificielle et le nomadisme avec des apiculteurs professionnels est difficile et conflictuel. L'utilisation de pesticides en apiculture est un autre sujet impopulaire ou plutôt tabou. Un optimisme aveugle est souvent exprimé, par exemple sur les pouvoirs de récupération spontanée de la nature, mais une surdité selective est également évidente. Malgré le fait que les apiculteurs sont eux-mêmes endommagés par les pratiques non durables qu'ils ont adoptées, c'est une mission difficile que d'essayer de les convaincre de s'autolimiter, de rendre cette activité plus r siliante. Pourtant, sans les pollinisateurs, nous devons tous imaginer une alimentation moins riche en cerises, pommes, haricots, amandes et bien d'autres d licies. Le trèfle, la luzerne et les autres cultures fourragères seraient compromis, tout comme la production de viande.

LA SÉLECTION GÉNÉTIQUE ANTHROPOCENTRIQUE RÉDUIT LA BIODIVERSITÉ

Il existe de nombreux écotypes d'abeilles domestiques adaptés à différents écosystèmes et climats : on connaît au moins vingt sous-espèces ou races géographiques d'abeilles domestiques (*Apis mellifera*), qui diff rent par leurs caractéristiques physiologiques, morphologiques et comportementales. Par exemple, l'*Apis mellifera ligustica* (répandue en Italie), l'*Apis mellifera mellifera* ou abeille noire, et l'*Apis mellifera caucasica* ou abeille grise sont originaires d'Europe et d'Afrique et ont été exportées dans le monde entier, où elles sont entrées en contact avec des espèces telles que celles d'Asie.

Parmi les causes du déclin des abeilles figurent l'érosion inquiétante du pool génétique d'*Apis mellifera* et le remaniement dévastateur des différentes sous-espèces (et des écotypes locaux). La sélection artificielle s'effectue en choisissant les meilleures colonies, selon des critères commerciaux, en utilisant l'insémination artificielle et en vendant des reines d'abeilles. Parmi les pratiques les plus artificielles de l'apiculture figurent la collecte de graines pour l'insémination artificielle et la production de gelée royale. Cette nourriture est normalement sécrétée par quelques jeunes abeilles ouvrières et n'est pas stockée. La gelée royale est produite et utilisée immédiatement pour nourrir la reine des abeilles.⁶⁷⁰ La production à des fins commerciales signifie que les abeilles doivent être élevées artificiellement et forc es à stocker la gelée royale dans des cellules spéciales construites par les éleveurs.

L'élevage pour produire des reines d'abeilles destinées à la vente a commencé en 1861 en Amérique du Nord, mais la technique a été perfectionnée au début des années 1900.⁹⁷² C'est pourquoi les reines des abeilles sont élevées artificiellement et commercialisées depuis de nombreuses années, et voyagent dans le monde entier.

Parmi les traits choisis par sélection génétique par les apiculteurs au fil des décennies, on trouve les suivants :⁴⁹⁰

- la plus grande productivité de miel ;
- moins d'agressivité ;
- la moindre capacité à produire des drones ;
- la plus faible propension à l'essaimage.

D'autres caractéristiques qui pourraient être souhaitées sont la résistance à différentes maladies, la capacité à voler à des températures plus basses, une plus grande capacité à accumuler de la cire ou de la propolis, de meilleurs instincts hygiéniques, c'est-à-dire des comportements tels que se toiletter mutuellement ou éloigner les animaux malades.

L'essaimage, c'est-à-dire l'envol de la vieille reine à la recherche d'un nouveau foyer avec une grande partie des abeilles ouvrières, a toujours été le système de reproduction des colonies. Avant l'essaimage, les abeilles remplissent leur tube digestif de miel afin de pouvoir survivre le plus longtemps possible loin de la colonie, c'est-à-dire pendant dix jours maximum. L'apiculture

industrielle sélectionne des abeilles qui ne sont pas enclines à essaimer naturellement, préférant l'essaimage artificiel, c'est-à-dire l'essaimage géré par les apiculteurs. Avec l'essaimage artificiel, un essaim peut produire deux ou trois essaims. Les problèmes qui pourraient être causés par un nombre trop faible de noyaux d'abeilles sans reine sont compensés par des techniques apicoles permettant la reproduction (l'insémination artificielle est également utilisée), la vente de reines d'abeilles et le nourrissage artificiel. Le manque de reines peut être temporairement compensé par l'administration de substances chimiques (hormones) qui imitent celles produites par la reine des abeilles.

Les caractéristiques sélectionnées permettent de domestiquer les abeilles pour répondre à des intérêts économiques, mais les rendent moins aptes à survivre dans la nature. Les colonies d'abeilles plus agressives, avec un nombre suffisant de faux-bourçons pour distribuer les gènes à d'autres territoires, et avec une forte tendance à l'essaimage, sont récompensées par la sélection naturelle, mais pas par la sélection artificielle des apiculteurs. Les apiculteurs influencent la sélection naturelle en utilisant régulièrement des médicaments contre les parasites (par exemple, des acaricides), en protégeant les abeilles des conditions climatiques défavorables, en les nourrissant artificiellement, en construisant des rayons de cire et en les déplaçant constamment. Il s'agit donc de caractères perdants car ils les affaiblissent et les rendent dépendants des apiculteurs qui utilisent des technologies de pointe et consomment beaucoup d'énergie. À titre d'exemple, en France, la sélection artificielle à l'aide de la reproduction assistée a permis de remplacer les abeilles noires locales, plus adaptées et résistantes, par des souches qui ont permis de doubler la quantité de miel produite. Ces hybrides sont moins adaptés à l'écosystème local et moins résistants aux maladies.²⁴³ Les écotypes locaux disparaissent et sont remplacés par des souches commerciales, souvent sélectionnées dans des laboratoires d'autres continents. Les souches sélectionnées artificiellement se croisent avec les souches sauvages ou indigènes, faisant disparaître les caractéristiques génétiques uniques. La pollution génétique entraîne l'extinction des caractéristiques phénotypiques adaptées à des écosystèmes particuliers.

Les éleveurs de reines d'abeilles, qui ne disposent que de quelques abeilles et donc d'un petit patrimoine génétique, approvisionnent des milliers d'apiculteurs dans le monde entier. On estime que la plupart des colonies élevées aux États-Unis sont issues de quelques centaines de reines d'abeilles.⁴⁸⁴ Il en résulte un appauvrissement génétique, l'amplification de traits artificiels et la pollution de traits uniques, ce qui entraîne l'érosion de la biodiversité sur la planète à un rythme sans précédent. On obtient ainsi un affaiblissement général et une perte permanente des caractéristiques locales. Le commerce des reines et des colonies d'abeilles (qui, dans certains cas, fait également l'objet de contrebande) favorise également la propagation des maladies.⁴⁸⁴

La possibilité d'acheter et de déplacer des abeilles partout, ainsi que la sélection artificielle pratiquée par l'homme, ont des effets secondaires :

- 1) la réduction de la diversité génétique des abeilles, qui entraîne également une plus grande sensibilité aux parasites, à la pollution et, en général, à tout changement ;
- 2) l'extinction des abeilles adaptées à la vie dans certains environnements, l'accouplement naturel ne pouvant être facilement empêché.

On estime qu'il existe au moins 31 sous-espèces dans le monde qui sont adaptées à des environnements uniques et qui peuvent s'accoupler avec *Apis mellifera*, ce qui entraîne une réduction de la biodiversité chez les abeilles. Le nomadisme permet donc l'hybridation avec des espèces similaires mais sauvages, mieux adaptées à des environnements particuliers, ce qui réduit la biodiversité. Les facteurs génétiques et comportementaux naturels conduisant à la résistance aux parasites tels que l'acarien *Varroa* disparaissent. La réduction du nombre de petits apiculteurs et l'augmentation du nombre d'apiculteurs industriels favorisent ce phénomène : en Europe, plus des trois quarts du miel sont produits par des apiculteurs industriels, c'est-à-dire ceux qui possèdent des milliers de ruches. Plus le nombre de ruches par apiculteur augmente,

plus le nombre d'apiculteurs en déplacement augmente, et plus la probabilité d'utiliser des insectes sélectionnés et reproduits en laboratoire selon des critères de rentabilité augmente.

Les abeilles d'élevage sont entrées dans une ère d'hybridation anarchique à l'échelle planétaire : elles peuvent être déplacées et achetées à volonté, sans aucune limite. Les sous-espèces les plus rustiques et sauvages s'accouplent avec celles sélectionnées par les apiculteurs, détruisant à jamais d'importantes ressources génétiques. Il est déjà arrivé que le croisement d'espèces sauvages avec des abeilles sélectionnées en laboratoire donne naissance à de nouveaux hybrides d'insectes qui se sont répandus dans l'environnement, créant de nombreux risques : en 1950, au Brésil, l'abeille africaine s'est accouplée avec l'abeille européenne.²³⁰ Des abeilles hyper-sélectionnées à variabilité génétique réduite se sont répandues dans la nature avec des conséquences catastrophiques. La fragilité, comme cela s'est produit pour de nombreux animaux domestiques (pensons au loup et au chien, ou au bétail), est favorisée, entraînant une sensibilité accrue à certaines maladies et aux changements des conditions environnementales.

La diversité génétique des abeilles domestiques est également menacée en Europe.¹²⁴⁴ Pour inverser cette tendance, des mesures doivent être prises sur plusieurs fronts, comme la réduction de l'utilisation de produits chimiques dans l'agriculture et la gestion de la reproduction des abeilles, qui doit favoriser le maintien des écotypes locaux. Les adaptations locales, par le biais de programmes de sélection régionaux, sont un moyen possible de maintenir et d'améliorer la biodiversité. Les apiculteurs devraient être plus régionaux et moins mondiaux, de manière à favoriser les stratégies de sauvegarde de la biodiversité.¹²⁴⁴ Les abeilles indigènes adaptées aux conditions locales spécifiques et uniques doivent être protégées et promues.

Le nomadisme a amené en Europe plusieurs ravageurs asiatiques (par exemple l'acarien *Varroa destructor*), qui ont participé à l'extinction de sous-espèces indigènes.⁴⁹⁰ Afin de protéger la biodiversité des différents écotypes locaux d'abeilles, qui sont capables de s'accoupler avec des abeilles élevées par des apiculteurs, il est nécessaire d'accepter des limites au nomadisme, au commerce et à certaines pratiques apicoles. En Italie, un appel à la protection de la biodiversité des sous-espèces indigènes d'*Apis mellifera* a été publié en 2018.⁴⁹⁰ Ce document rappelle qu'il existe 31 sous-espèces d'*Apis mellifera* originaires d'Europe, d'Afrique, du Moyen-Orient et d'Asie centrale. En Europe et dans la région du Caucase, 15 sous-espèces sont classées, en Afrique 11 sous-espèces et au Moyen-Orient et en Asie centrale 5 sous-espèces. L'abeille domestique a été transportée par les apiculteurs dans le reste du monde, notamment en Amérique et en Australie. Le nomadisme et le commerce des abeilles ont appauvri génétiquement les populations locales, entraînant une perte irréversible de la biodiversité. Afin de protéger la biodiversité qui a survécu en Italie, composée de quatre sous-espèces, il nous est demandé d'entreprendre des actions ciblées (*Apis mellifera ligustica*, *Apis mellifera siciliana*, *Apis mellifera mellifera* dite abeille noire ou abeille allemande, *Apis mellifera carnica* ; les deux dernières ne sont probablement présentes que sous forme de populations hybridées avec *Apis mellifera ligustica*). Malheureusement, cet appel, qui est une demande légitime et sensée pour une plus grande protection des écosystèmes et de la biodiversité locale, a été suivi d'un communiqué officiel des présidents de trois associations nationales d'apiculteurs italiens (signé le 31 mai 2018). Dans ce communiqué, certains porte-parole influents des apiculteurs italiens écrivent qu'ils ne partagent pas les bonnes intentions et l'esprit de l'initiative. Les intérêts commerciaux à court terme prévalent : la possibilité de fixer des limites au nomadisme et au commerce des abeilles est supprimée.

En résumé, les mesures qui pourraient être prises pour réduire la poursuite de la perte de biodiversité (et au-delà) comprennent :

- L'interdiction de l'introduction de sous-espèces différentes dans les zones présentant des écotypes locaux.
- La mise en place de zones de sécurité à au moins 20 km des sites à protéger (ex : sites de reproduction). Protection des écosystèmes où résident des espèces végétales et animales

sauvages (par exemple, les pollinisateurs) présentant un intérêt naturaliste particulier. Ici aussi, on pourrait établir des zones tampons de sécurité où la reproduction des insectes serait interdite.

- L'interdiction de l'importation de reines d'abeilles.
- Le suivi de tous les mouvements des animaux, y compris les reines d'abeilles et les petits noyaux.
- L'enregistrement du commerce du recyclage et de la cire.
- L'interdiction du commerce et de l'élevage d'autres sous-espèces d'abeilles sur le territoire à protéger.
- L'établissement de zones de sauvegarde dans les zones de reproduction naturelle possible ou d'élevage de reines d'abeilles (d'au moins 200 kilomètres carrés).
- L'interdiction du nomadisme permettant uniquement l'apiculture sédentaire.
- La protection des habitats où résident les écotypes locaux.
- La définition des densités maximales de ruches par unité de surface, en fonction du type d'écosystème.
- Encourager la reproduction locale des colonies d'abeilles, de manière à favoriser la sélection et le maintien d'écotypes présentant des caractéristiques adaptées aux habitats de zones géographiques particulières.
- L'interdiction d'utiliser des médicaments pour traiter les abeilles.
- L'enregistrement de toutes les maladies et problèmes de santé.
- L'enregistrement de toutes les pratiques apicoles, y compris l'alimentation artificielle et le blocage de l'essaimage.

Les apiculteurs doivent être encouragés à tenir tous les registres utiles qui peuvent être gérés électroniquement, en utilisant internet et les applications de téléphonie mobile. Cela pourrait fournir des informations très utiles en temps réel, permettant de prendre des mesures rapides. Cela permettrait de prévenir plus efficacement les épidémies.

Il serait opportun de mettre en place des tables de travail où nous pourrions commencer à évaluer la mise en œuvre de ces mesures nécessaires pour sauver l'apiculture.

Parmi les solutions mises en œuvre par les chercheurs pour préserver la biodiversité figure la cryoconservation des gamètes d'abeilles en vue de leur utilisation en reproduction assistée. Cette technologie peut apporter une certaine aide, mais elle ne constitue pas une solution.

La sauvegarde de la biodiversité est une priorité indispensable. Le génome de l'abeille domestique (*Apis mellifera*), qui se compose de 32 chromosomes (46 chez l'homme), a été entièrement séquencé en 2006. Il est réaliste d'envisager la génération d'abeilles génétiquement modifiées en laboratoire, qui seront un jour vendues aux apiculteurs.¹⁶⁷ En 2014 déjà, les premières abeilles transgéniques ont été générées, capables de transmettre la modification génétique prévue à leur progéniture.^{168, 169, 170, 171} Il n'est pas déraisonnable d'imaginer la création d'abeilles résistantes aux insecticides-acaricides (utilisés dans les champs et par les apiculteurs) et incapables de produire des reines utilisables de manière productive. Comme cela s'est produit avec certaines plantes génétiquement modifiées, des entrepreneurs peu scrupuleux pourraient espérer privatiser et monopoliser le service de pollinisation et, plus généralement, saper la souveraineté alimentaire de la communauté afin de réaliser d'énormes profits. La sélection artificielle a récompensé les plantes stériles par une résistance aux herbicides.¹⁷⁵ Quelque chose de similaire pourrait se produire avec les insectes pollinisateurs de race. Il faut se rappeler que chaque graine au cœur d'un fruit contient un verger invisible. La sélection artificielle de plantes qui produisent des graines stériles ou des plantes incapables de se reproduire sexuellement est une stratégie suicidaire et, pour cette raison, devrait être interdite et combattue par tous les moyens possibles. Le registre fossile indique que les plantes à graines remontent à trois cent soixante millions d'années.⁷⁰⁴ La sélection artificielle opérée par l'homme

détruit une voie d'évolution que la nature a sélectionnée comme réussie pendant des centaines de millions d'années. Les semences vivantes sont la base d'une agriculture durable dédiée à la biodiversité, en réalité le contraire de la monoculture.

La sélection opérée par l'homme favorise également les plantes qui sont moins attrayantes pour les insectes, voire rompt la symbiose entre l'insecte et la fleur. Les plantes qui n'ont pas besoin de pollinisation, les fruits sans graines ou les fleurs qui ne produisent pas de nectar. C'est le cas des nouvelles variétés de tournesol qui produisent beaucoup moins de nectar et sont donc moins attrayantes (les ancêtres des plantes de tournesol actuelles sont originaires d'Amérique du Nord).

230

Des zones de refuge, ou réserves naturelles, devraient être créées pour éviter que des abeilles aux caractéristiques génétiques uniques ne disparaissent par hybridation avec des abeilles super-sélectionnées par les généticiens et les apiculteurs. La création de zones protégées est le seul moyen de préserver les différents écotypes d'abeilles endémiques et d'éviter une érosion génétique incontrôlée.

L'intrusion humaine a radicalement modifié l'équilibre nécessaire entre les pollinisateurs et la nature. Les feuilles de cire pré-imprimées et la nutrition artificielle altèrent la reproduction. La sélection d'hybrides commerciaux qui parcourent le monde a appauvri le patrimoine génétique et l'a réduit irrémédiablement. L'invasion de l'homme dans la vie des abeilles les a détachées des règles du jeu de la sélection naturelle. En conséquence, les colonies sont devenues désespérément faibles. La décision la plus sage concernant la sélection des abeilles serait probablement d'arrêter de sélectionner artificiellement les abeilles et de laisser faire la nature. Décider, en conscience ou par jeu, quels traits (gènes) faire disparaître à jamais ou récompenser, selon des critères anthropocentriques et égoïstes (car asservis aux règles économiques) est très risqué. Ne pas jouer au directeur de l'évolution dans ce cas pourrait être la stratégie gagnante pour sauver les abeilles mellifères de l'impasse de l'érosion de la diversité génétique (et autre). La variabilité génétique doit être maintenue à un niveau élevé pour que le hasard permette la survie des caractères qui peuvent résister aux changements inévitables.

PRATIQUES CONTRE NATURE

De nombreuses activités menées par les apiculteurs interfèrent avec la biologie et la santé du superorganisme de la ruche.

- Dans la nature, une colonie d'abeilles génère plusieurs reines qui devront se battre entre elles pour gagner la fidélité de toute la colonie. La sélection sanglante qui a lieu parmi les reines d'abeilles, qui s'entretuent jusqu'à ce qu'une seule survive, est un événement stratégique et essentiel pour la colonie et l'espèce. Cette sélection naturelle fait totalement défaut lorsque c'est l'apiculteur qui fournit à la colonie orpheline une seule reine provenant d'une autre colonie ou d'une ferme située à des milliers de kilomètres.

- La séparation physique et géographique entre les colonies d'une même race mais aussi entre différentes espèces (par exemple entre *Apis mellifera* et *Apis cerana*) est essentielle pour maintenir et sélectionner les caractéristiques gagnantes pour des conditions environnementales spécifiques et uniques. Le démantèlement de ces barrières, qui a lieu depuis des milliers d'années, dans le cas de l'apiculture, réduit la variabilité génétique nécessaire aux processus essentiels de l'évolution.

- Nourrir et fournir un nid artificiel.

- Dans un nid d'abeilles naturel, il peut y avoir différents types de cellules : une pour les ouvrières, une pour les bourdons et une pour les reines. Les abeilles ouvrières construisent des cellules de différentes tailles et caractéristiques sur la base d'un plan

démographique, fournissant un certain nombre pour le miel, les ouvrières et les bourdons. Ainsi, la composition du rayon de miel guide également la ponte de la reine des abeilles. Les feuilles de cire artificielle ont été inventées par un Allemand en 1857. Ce procédé artificiel altère donc la vie naturelle des colonies depuis de nombreuses années. Les feuilles de cire pré-imprimées avec uniquement des cellules d'ouvrières empêchent ou ne permettent pas l'élevage du nombre nécessaire de faux-bourdons pour les fonctions de reproduction et de sélection (les feuilles de cire naturelles sont blanches alors que celles recyclées par les apiculteurs sont jaunes). Cette pratique réduit la population masculine. L'utilisation de feuilles de cire pré-imprimées modifie un dessin qui a évolué au cours de millions d'années. En outre, la cire recyclée contient des concentrations plus élevées de substances toxiques (par exemple, des acaricides) et peut contenir de la paraffine. En recyclant la cire, les apiculteurs bénéficient d'un certain nombre d'avantages, comme l'augmentation de la production de miel (les abeilles économisent de l'énergie : il leur faut jusqu'à 10 kg de miel pour produire 1 kg de cire) et le contrôle de la conception de la population (par exemple en empêchant la croissance des bourdons).

- Une autre pratique qui diminue la population de bourdons est la suppression du couvain mâle dans le but d'obtenir un avantage dans la lutte contre un parasite, le *varroa*. Les pratiques apicoles consistent à remplacer les rayons contenant des cellules pour le couvain mâle par des cellules pour le couvain femelle. Il est raisonnable de penser que ces techniques apicoles sélectionneront les acariens qui préféreront parasiter le couvain femelle.

- L'enfumage périodique pour étourdir les abeilles, dans le but de les rendre plus dociles lors de l'inspection, est une autre invasion. Les abeilles ressentent cette intrusion comme une alarme incendie et se préparent donc à fuir. La migration est la seule stratégie de survie en cas d'incendie. La présence de la fumée modifie l'ordre social.

- La socialité et la communication au sein de la colonie sont régulées par la production d'hormones, qui sont des substances chimiques uniques ou des mélanges. La communication chimique au sein de la ruche est très complexe et les différents écotypes d'abeilles ont développé des mécanismes légèrement différents (par exemple, différents mélanges chimiques). Le brassage génétique favorise l'affaiblissement de ce système de communication et l'uniformise.

- L'arrêt de l'essaimage est une pratique courante et bien établie en apiculture car il est considéré comme une perte économique sérieuse. Les techniques utilisées comprennent l'élimination des cellules royales, c'est-à-dire celles qui donneront naissance aux nouvelles reines des abeilles, et le remplacement de l'ancienne reine par une nouvelle achetée de loin (la reine peut également être introduite déjà fécondée).⁹⁷³ Il est étonnant que l'événement naturel nécessaire à la reproduction des colonies, l'essaimage, soit considéré comme un cauchemar ou une calamité par la plupart des apiculteurs. Pourtant, l'essaimage est la manière dont une colonie génère sa propre progéniture, tout comme une naissance.

- L'essaimage, c'est-à-dire le fait qu'une fraction de la colonie quitte son ancien domicile pour en chercher un nouveau, permet aux abeilles asiatiques (*Apis cerana* et *Apis dorsata*) de combattre et de maîtriser des parasites tels que l'acarien *Varroa destructor*. La valeur sanitaire de l'essaimage est sous-estimée. Le blocage systématique de ce comportement (par exemple par l'utilisation d'hormones), ainsi que la surpopulation des colonies dans les territoires et le nomadisme, favorisent la propagation de l'un des principaux ennemis des apiculteurs. Une autre pratique utilisée pour prévenir l'essaimage consiste à couper l'aile de la reine des abeilles, ce qui l'empêche de s'envoler.

- Le changement programmé continu, souvent annuel, des reines entrave la sélection naturelle et facilite l'homogénéité génétique, l'affaiblissement et la propagation des maladies.

- Les abeilles abritent des micro-organismes qui constituent le microbiote et sont aussi nécessaires et utiles qu'au moins une douzaine d'espèces de bactéries. Les micro-organismes ont évolué avec les différents écotypes d'abeilles (sous-espèces), mais cet héritage a été altéré par le mélange des abeilles mellifères à travers le monde et par des molécules à action antibiotique (ex : certains médicaments utilisés en apiculture et certains pesticides utilisés en agriculture endommagent la flore microbienne).

- Pour lutter contre l'acarien parasite *Varroa*, la pratique de l'installation d'un fond anti-*Varroa*, c'est-à-dire d'un grillage sous lequel est placé un plateau métallique, s'est généralisée. Dans ce fond artificiel, il est possible de contrôler la présence des acariens qui tombent soit naturellement, soit suite à l'utilisation d'acaricides. Les abeilles ont besoin d'un environnement qui peut être nettoyé ; ce système entrave le nettoyage et facilite la présence d'un autre parasite : la fausse teigne.

- Il est possible d'acheter des hormones qui sont libérées dans la ruche de manière contrôlée et restent actives pendant des semaines. De cette façon, un comportement spécifique peut être induit artificiellement. Il est possible d'acheter des mélanges d'hormones normalement produites par la reine des abeilles à des fins différentes : ²²⁴

- réduire la production de drones ;
- garder les abeilles tranquilles en l'absence de reine ;
- arrêter l'essaimage ;
- attirer les abeilles dans une ruche sans reine.

De nombreuses pratiques interfèrent avec la biologie et la santé des abeilles et des autres pollinisateurs. Lorsque l'homme intervient dans la gestion de la nature, il cause des dommages qui, dans certains cas, montrent leurs effets longtemps après. Des limites doivent être acceptées pour préserver l'avenir.

MONÉTISER LES SERVICES INDISPENSABLES DE LA NATURE : UNE APPROCHE RÉDUCTRICE ET ANTI- ÉCOLOGIQUE

LE SERVICE DE POLLINISATION INDISPENSABLE À LA SÉCURITÉ ALIMENTAIRE

La pollinisation peut être assurée par le vent (anémophile), par d'autres facteurs abiotiques (pluie, gravité, forces électrostatiques) ou par des animaux tels que les oiseaux, les chauves-souris, les mammifères ou les insectes. Les plantes ont adopté de nombreuses stratégies différentes pour diffuser le pollen et les fruits. Par exemple, une plante herbacée originaire du Canada (*Cornus canadensis*), dont les fleurs se trouvent à environ 20 cm du sol, utilise un système mécanique pour catapulter les grains de pollen à une vitesse de trois mètres par seconde, leur permettant d'atteindre dix fois la hauteur de la fleur.⁹⁸⁶

Le vent et les insectes sont les agents les plus importants de la pollinisation. Il y a probablement 135 millions d'années, la plupart des plantes dépendaient du vent pour leur pollen et en gaspillaient une grande partie. Les fleurs ont d'abord engagé des insectes pour transporter le pollen, puis ont commencé à produire du nectar pour les récompenser. Les plantes fertilisées avec l'aide des insectes ont eu beaucoup de succès, se sont diversifiées et ont commencé à se faire concurrence pour les attirer. Cet esprit de compétition a favorisé la diversification des fleurs et la spécialisation des relations entre plantes et insectes (par exemple, un papillon de nuit de 6 cm peut avoir une trompe de 30 cm de long, c'est le *Xantopan morgani*).⁶⁸⁸ Parmi les insectes pollinisateurs par excellence figurent les abeilles, qui dérivent de guêpes probablement carnivores.

Dans le cas de la pollinisation entomophile, certaines plantes sont hautement spécialisées dans la mesure où elles ne peuvent être fécondées qu'avec l'aide d'une ou de quelques espèces d'insectes. Dans certains cas, des symbioses très spécifiques ont été établies, comme celle du figuier. Pour certaines fleurs, une seule visite des insectes pollinisateurs suffit à apporter suffisamment de pollen pour former le fruit. Dans d'autres cas, il est nécessaire de transporter le pollen pendant plusieurs visites. Chez les plantes telles que les pommes, les poires, les melons, les citrouilles et les kiwis, une seule visite de l'insecte pollinisateur ne suffit pas pour déposer le pollen nécessaire.⁴⁶⁹

Estimer la valeur du capital naturel, c'est-à-dire tenter de monétiser les services que la nature fournit gratuitement, est une tâche difficile. Une simplification excessive conduit à négliger des aspects importants qui, dans de nombreux cas, sont encore inconnus. Lorsque nous parviendrons à donner une valeur monétaire aux services importants fournis par les écosystèmes, il sera probablement trop tard, car nous serons contraints de quantifier des dommages irréparables. Quelques tentatives de quantification des bénéfices générés par les pollinisateurs pour la production agricole sont présentées ci-dessous.

En Europe, environ 80% des cultures et des plantes sauvages dépendent des insectes et, parallèlement, au moins 9% des abeilles et des papillons sont certainement gravement menacés (plus de 50% dans certains États).^{260, 481} En Europe, 84% des espèces cultivées bénéficient de la présence d'insectes pollinisateurs et dans le monde, 87 cultures sur les 124 utilisées pour la consommation humaine (70%) bénéficient de la présence d'insectes pollinisateurs.⁷⁵³ À cet

égard, il est utile de rappeler que la valeur économique moyenne de la production agricole qui ne dépend pas des pollinisateurs (par exemple, les céréales) est d'environ 151 euros/tonne, tandis que pour celles qui dépendent dans une certaine mesure des pollinisateurs, elle est de 761 euros/tonne. En 2005, la production agricole mondiale des 46 cultures qui dépendent au moins partiellement des pollinisateurs était estimée à 39% de la valeur totale.⁷⁵³ La contribution des insectes pollinisateurs à la production de 2005 est estimée à 153 milliards d'euros. On considère que sur 46 cultures, seules 6 sont très dépendantes des pollinisateurs (plus de 90% de la récolte est perdue en l'absence de pollinisateurs) et 13 ont une forte dépendance (entre 40% et 90% de la récolte est perdue en l'absence de pollinisateurs). Selon ce critère, seules certaines cultures risquent de ne générer aucune production économiquement intéressante en l'absence d'insectes pollinisateurs, tandis que pour d'autres cultures, la production est réduite quantitativement et qualitativement mais continue à présenter un certain intérêt économique (par exemple, réduction de moins de 30% en l'absence de pollinisateurs). Ainsi, le taux de vulnérabilité est variable et peut être supérieur à 90% dans le cas de certaines cultures dépendant des pollinisateurs comme le café et le cacao. Les cultures pour lesquelles la pollinisation animale présente un avantage économique indiscutable représentent probablement moins de 10% de la production agricole mondiale, mais contribuent à générer au moins un tiers de la valeur marchande et, plus important encore, sont la principale source de nutriments essentiels tels que certaines vitamines.⁷⁵³ Pour rester en bonne santé, nous devrions manger au moins 400 g de fruits et/ou de légumes par jour (hors céréales), mais en Europe, 50% de la population n'atteint probablement pas cet objectif nutritionnel ; la situation est plus grave dans d'autres pays.

Selon une autre estimation, environ 87 des 115 espèces les plus importantes (75%) cultivées par l'homme bénéficient de la présence des pollinisateurs, comme les amandes, les pommes, le cacao et le café. Ces 87 cultures représentent 35% de la production agricole mondiale totale.³⁴⁸ Une diminution de la présence des pollinisateurs (il existe au moins 40.000 espèces, dont environ 25.000 sont des abeilles) pourrait entraîner une réduction de la production alimentaire d'au moins 5 à 8% et une diminution du choix.^{193, 481} Les cultures dépendant de la pollinisation animale sont la principale source de certains micronutriments importants tels que la vitamine A, la vitamine C et l'acide folique.⁴⁸¹ La réduction du service de pollinisation pourrait avoir un effet négatif sur la variété des aliments disponibles et la quantité de micronutriments. En conséquence, elle pourrait favoriser la propagation de certaines maladies évitables et augmenter le nombre de décès (par exemple, 1,4 million de décès supplémentaires dus à des maladies cardiaques).⁴⁸¹ Pour compenser la perte de production de 3 à 8% de certaines espèces végétales due au déclin des pollinisateurs, il faudrait augmenter la surface cultivée d'au moins 25%.⁸⁵⁵ Ce calcul est purement théorique et ne tient pas compte de nombreux facteurs, mais il donne une idée de l'importance des plantes pollinisées dans notre alimentation.

DES PLANTES DIFFÉRENTES BÉNÉFICIENT DE POLLINISATEURS DIFFÉRENTS

Plusieurs stratégies peuvent être utilisées pour évaluer l'importance du service de pollinisation.⁴⁶⁹ On peut bloquer artificiellement la possibilité que les fleurs reçoivent du pollen transmis par les insectes en les recouvrant de filets. De cette façon, il est possible d'évaluer si la pollinisation entomophile est importante. Dans certains cas, même les graines de plantes qui peuvent s'autoféconder, lorsqu'elles sont croisées avec des plantes génétiquement différentes, produisent des plantes plus vigoureuses. Avec ces expériences, il est facile de découvrir que des plantes telles que les amandes, les pommes ou les prunes doivent être pollinisées par des variétés spécifiques, le choix du type de pollen est donc également important. L'étude de

l'importance de la contribution des pollinisateurs sauvages est difficile et nécessite des techniques telles que l'utilisation de caméras vidéo.

La capacité d'une espèce d'insecte à polliniser avec succès une plante peut être mesurée en évaluant :

- la quantité de pollen transportée à chaque voyage, par jour, et la quantité de pollen libérée dans chaque fleur femelle (à l'intérieur du stigmate) ;
- le nombre de fleurs visitées à chaque voyage et le nombre de fleurs visitées pendant la floraison ;
- la zone de dispersion des insectes ;
- le nombre de graines et de fruits produits grâce à la visite des fleurs (ce nombre peut être comparé à celui produit en privant artificiellement la pollinisation entomophile) ;
- la qualité des fruits obtenus : couleur, taille, forme, quantité de sucres, acidité, absence de défauts, turgescence, arôme et valeur nutritionnelle (vitamines et sels minéraux) en présence ou en l'absence de pollinisation entomophile ;
- la quantité de fruits par plante et par unité de surface ;
- la capacité des graines à germer et à générer des plantes vigoureuses ;
- la résistance aux facteurs de stress tels que les pesticides ;
- la fidélité des insectes à une espèce (il s'agit de la capacité à rechercher toujours le même type de fleur, appelée constance florale) ;
- l'attraction générée et, par conséquent, la préférence entre différents types de nectar et/ou de pollen ;
- la densité d'insectes et/ou de colonies nécessaires à la fécondation des fleurs sur 10.000 mètres carrés. Dans le cas des abeilles domestiques, on utilise généralement entre 2 et 5 colonies et jusqu'à 25 colonies par hectare (par exemple dans le cas de la fleur de myrtille).⁴⁶⁹

Ces informations montrent clairement qu'il n'est pas facile d'évaluer la qualité du service de pollinisation et d'en estimer le bénéfice économique. Dans de nombreux cas, les informations sur la contribution des pollinisateurs sauvages sont insuffisantes et leur rôle peut être sous-estimé.

Les fraises pollinisées par les abeilles (par exemple, les abeilles solitaires comme *Osmia* et, dans une moindre mesure, les abeilles domestiques) atteignent une valeur commerciale plus élevée que les fraises pollinisées par le vent ou autopollinisées. Les fruits seront plus lourds, auront moins de déformations, auront une teneur en sucre plus élevée et seront plus colorés.⁶⁷⁶ La résistance au stockage est augmentée de 11% ; il convient de mentionner ici que dans le cas des fraises, la plupart des fruits peuvent devenir invendables après seulement 4 jours. Tous ces facteurs augmentent considérablement les avantages économiques du service de pollinisation pour les producteurs de fraises. Un aspect intéressant est que les fraises sont pollinisées à 65% par des abeilles sauvages, comme l'*Osmia* (52%), le bourdon terrestre (*Bombus terrestris* pour 4%) et d'autres espèces de bourdons (encore 4%). Les abeilles domestiques contribuent à hauteur de 34% et certaines mouches au reste. Ainsi, les abeilles domestiques ne sont pas le pollinisateur le plus important pour améliorer la qualité des fraises : globalement, au moins 12 espèces de pollinisateurs sauvages, y compris les abeilles solitaires, sont plus importantes. Des résultats similaires ont été obtenus pour les plantes de café, cacao, melon, nêfle, colza et concombre.⁶⁷⁶ La pollinisation par les animaux sauvages (abeilles sauvages solitaires dans le cas des fraises) est très importante et difficile à évaluer. Espérer résoudre le problème du déclin des insectes en s'appuyant à l'avenir sur une sorte de pollinisateur universel, comme les abeilles domestiques, est naïf et erroné.

En Europe, la pollinisation par les insectes augmente la quantité et la qualité de la production de colza (*Brassica napus*), de féveroles (*Vicia faba*), de fraises (*Fragaria x ananassa*) et de sarrasin (*Fagopyrum esculentum*). La quantité, grâce aux insectes, augmente

entre 18% et 71% ; en outre, le colza contiendra plus d'huile et les fraises auront une meilleure qualité commerciale.⁷⁴⁷ Même pour ces cultures, les abeilles domestiques ne peuvent que partiellement compenser le manque de pollinisateurs sauvages. En moyenne, 13 espèces de pollinisateurs ont été enregistrées dans les champs de fraises et 11 espèces de pollinisateurs dans les champs de fèves ou de sarrasin. Le nombre moyen d'espèces de pollinisateurs variait entre 2 et 26. L'amélioration de la biodiversité autour des champs cultivés accroît la présence des pollinisateurs, la qualité et la quantité des récoltes et rend le système agricole plus résistant aux changements tels que le changement climatique.

Simplifier les écosystèmes agricoles et confier la majeure partie de la production végétale à quelques insectes domestiqués est très risqué et non durable. Les pollinisateurs universels n'existent pas. Confirmant cette fragilité, l'évaluation de l'efficacité de différentes catégories d'insectes sur quatre types différents de pommes cultivées au Royaume-Uni a montré que les insectes ne sont pas équivalents. Certaines variétés de pommes sont pollinisées avec plus de succès par certains insectes.⁷⁰⁹ En général, les abeilles solitaires se sont révélées plus importantes que les abeilles domestiques et les abeilles domestiques plus efficaces que les bourdons. L'importance des abeilles sauvages est confirmée, car elles génèrent des bénéfices économiques pour les producteurs de pommes qui sont plus de deux fois supérieurs aux bénéfices obtenus en utilisant des abeilles domestiques (*Apis mellifera*). Pour trois variétés de pommes (*Cox*, *Gala* et *Bramley*), plus de 54% du service de pollinisation est assuré par des insectes sauvages et seulement 25-28% par des abeilles domestiques (entre 13% et 21% par des bourdons). Les pollinisateurs sauvages sont très importants pour soutenir et améliorer la production agricole comme les pommes, car les abeilles domestiques sont moins efficaces. Au Royaume-Uni, le service de pollinisation dans les vergers de pommiers génère des bénéfices compris entre 8.500 et 14.500 euros par hectare et par an, selon la variété. Pour maintenir cette rentabilité, il est important d'aider les pollinisateurs sauvages en assurant des zones semi-naturelles avec des plantes et des fleurs qui fournissent du pollen, du nectar et des sites de nidification. Dans les fleurs des vergers de pommiers (aux États-Unis), ainsi que dans le pollen et le nectar, on trouve les pesticides acétamipride, thiaclopride, imidaclopride, thiaméthoxam et myclobutanil (à des concentrations allant jusqu'à 70 ppb) : les agriculteurs et les apiculteurs devraient établir des symbioses plus prospectives.¹²²⁴

L'estimation de la valeur économique du service rendu par les pollinisateurs tels que les abeilles comporte de nombreuses incertitudes et ne tient pas suffisamment compte de facteurs écologiques importants. Les facteurs économiques sont également difficiles à évaluer. Par exemple, les personnes employées dans la culture des amandes, du cacao, du café et des pommes perdraient leur emploi : au moins 1,4 milliard de personnes dans le monde sont employées dans le secteur agricole.⁴⁸¹ Un autre aspect critique sous-estimé est celui généré par les monopoles : pour donner un exemple, le marché de la production de cacao est majoritairement contrôlé (80%) par deux grandes entreprises ; malgré cette condition potentiellement favorable (peu d'acteurs impliqués), il est toujours difficile d'obtenir des informations sur les conditions écologiques et sociales des cultures.⁹⁸⁰

L'ESTIMATION ÉCONOMIQUE DU SERVICE FOURNI PAR LES POLLINISATEURS

Il existe différentes estimations de la valeur du service de pollinisation qui sont très variables, selon les espèces et les conditions considérées. Certaines espèces sont partiellement dépendantes de la pollinisation pour produire des fruits de qualité, d'autres sont pollinisées par plusieurs espèces d'insectes et, par conséquent, il est plus compliqué d'estimer la contribution des abeilles d'élevage ou sauvages. Entre 80 et 90% des plantes sauvages dépendent des insectes pollinisateurs, et 60% des oiseaux se nourrissent d'insectes ou uniquement d'insectes.

Les estimations de la valeur du service de pollinisation fourni par les insectes sauvages et d'élevage présentent de nombreuses limites et peuvent être considérées comme des sous-estimations. Plusieurs estimations de la valeur économique de la pollinisation sont données ci-dessous pour donner une idée des chiffres considérés par les experts :

- 260 milliards par an (tous les pollinisateurs de la planète). ¹⁹⁶
- Entre 235 et 577 milliards USD (2015) par an (tous les pollinisateurs de la planète). ⁴⁸¹
- Les services rendus par les insectes sauvages aux États-Unis sont évalués à au moins 57 milliards de dollars par an. ^{346, 348}
- Entre 78% et 94% des fleurs sauvages européennes dépendent de la pollinisation par des facteurs biotiques. La valeur de la pollinisation par les insectes en Europe est estimée à environ 22 milliards d'euros par an et 84% des cultures dépendent directement ou indirectement des insectes pollinisateurs. ¹³
- 153 milliards par an (tous les pollinisateurs pour les 100 cultures les plus importantes), dont 14,2 milliards dans l'Union européenne. ^{243, 864} Ce chiffre équivaut à environ 9,5% de la valeur monétaire de l'ensemble de la production alimentaire mondiale en 2005 (qui est estimée à au moins 50 milliards d'euros pour les légumes, un chiffre équivalent pour les fruits et 39 milliards d'euros pour les oléagineux). ⁷⁵³
- En Europe, la valeur du service de pollinisation assuré principalement par les abeilles a généré une richesse équivalente à 12% de la valeur de l'ensemble de la production agricole européenne entre 1991 et 2009. ⁷⁰⁷ En Europe, la dépendance et donc la vulnérabilité du service de pollinisation augmente du nord au sud, parallèlement à l'augmentation du nombre d'espèces végétales nécessitant une pollinisation : l'Italie et l'Espagne sont les États les plus dépendants des pollinisateurs. La culture européenne la plus importante en termes de sensibilité aux pollinisateurs est la pomme, suivie par la pêche. Dans le monde, cette dépendance est plus faible : la disparition des pollinisateurs pourrait entraîner une perte de 9,5% de la valeur de l'ensemble de la production agricole (en 2005). La valeur économique des produits agricoles dépendant de la pollinisation est étroitement liée à la biodiversité des insectes. En résumé, il est réaliste d'attribuer au service de pollinisation une valeur économique comprise entre 9% de la production agricole mondiale et 12% de celle de l'Europe. Il s'agit sans doute d'une sous-estimation, puisque seule l'augmentation de la production générée par la présence des pollinisateurs est évaluée, en tenant compte des prix du marché des différents produits végétaux. ⁷⁰⁷ D'autres aspects plus difficilement quantifiables devraient également être quantifiés, tels que les dommages aux écosystèmes qui seraient générés par la disparition des pollinisateurs (au moins 2.000 espèces d'insectes en Europe), la perte d'emplois, l'augmentation des maladies dues à des carences nutritionnelles (par exemple en vitamines A et C), les dommages générés aux cultures qui dépendent des insectes uniquement pour la reproduction et non pour la production (par exemple les pommes de terre) et les dommages générés à la production d'aliments pour animaux.

- En Europe, le service de pollinisation en agriculture génère une valeur économique d'au moins 22 milliards d'euros, soit 10% de la valeur économique de la production alimentaire.⁷³³ En Europe, le service de pollinisation bénéficie à 12% de la surface cultivée et est essentiel pour au moins 3% de la surface agricole. En Italie, au moins 2,5 millions d'hectares de terres agricoles bénéficient du service de pollinisation fourni par les insectes, en Allemagne ou en Grèce 2,2 millions d'hectares, en Espagne 5 millions d'hectares et en France 6,1 millions d'hectares.⁷³³ On estime que la perte totale du service de pollinisation en Europe entraînerait des dommages à la production alimentaire de l'ordre de 190 à 310 milliards d'euros.

On trouve ci-dessous quelques estimations économiques des avantages fournis par les pollinisateurs dans certaines cultures (en dollars US par hectare) :⁷⁶⁶

- pastèques (USA ; 2009) : 267 - 5.400 ;
- café (Brésil ; 2003) : 2.415 ;
- colza (Irlande ; 2009-2011) : 652 ;
- fraises (Europe ; 2009) : 14.968 ;
- framboises (Royaume-Uni ; 2010) : 7.641 ;
- pommes (Royaume-Uni ; 2010 et 2012) : 14.000 - 25.000 ;
- myrtilles (Canada ou USA ; 2013) : 20.000 - 26.500 ;
- tomates (Canada ; 2001) : 434 - 2.344.

A l'échelle mondiale, selon la méthode d'estimation utilisée, les bénéfices économiques moyens générés par le service de pollinisation vont de quelques dizaines de dollars par hectare à plusieurs milliers par hectare (l'écart-type est plus élevé que la valeur moyenne, ce qui indique un facteur d'incertitude considérable). Les différentes méthodes d'estimation génèrent des valeurs qui diffèrent par un facteur de plus de 10 et jusqu'à 1.000, de sorte que les résultats sont très incertains. Par exemple, pour le café, les estimations de la valeur économique du service des pollinisateurs varieraient de moins de 160 dollars par hectare à plus de 2.400 dollars par hectare. En général, en Amérique du Nord ou en Europe, la valeur économique du service des pollinisateurs est estimée à plus de 1.500 dollars par hectare et par an.⁵⁸⁵ Pour donner un exemple, les amandes et les myrtilles dépendent de la pollinisation entomophile et, pour les premières seulement, ce service génère une valeur économique mondiale d'environ 265 milliards d'euros par an.⁵⁸⁵

À titre de comparaison, les bourdons terrestres sont élevés depuis environ 30 ans pour polliniser les tomates. Auparavant, les tomates sous serre étaient pollinisées à l'aide de bâtons spéciaux par des équipes d'ouvriers qui passaient trois fois par semaine sur les fleurs, à grands frais.⁶⁸⁸

De manière simpliste, plusieurs méthodes ont été utilisées pour obtenir les estimations ci-dessus afin d'évaluer économiquement le service rendu par les pollinisateurs :^{760, 763, 864}

- Le coût du soutien à la pollinisation manuelle, en remplacement de la pollinisation naturelle.
- Le coût de la location de colonies d'abeilles, qui remplacent les insectes sauvages, pendant la floraison.
- La réduction de la valeur économique de la culture résultant de l'absence d'insectes pollinisateurs. Dans ce cas, la valeur marchande de la culture est multipliée par la quantité perdue en raison de l'absence de pollinisateurs. Les cultures sont classées en fonction de la réduction de la qualité et de la quantité des fruits en l'absence de pollinisateurs. Pour certaines cultures, la dépendance est très forte : des réductions de plus de 60% de la quantité en l'absence de pollinisateurs. Dans de nombreuses cultures, il est difficile d'évaluer la contribution des pollinisateurs sauvages, de sorte que leur valeur est souvent sous-estimée.

Ces différentes méthodes appliquées aux mêmes cultures donnent des estimations très différentes et, en tout état de cause, ne tiennent pas compte de nombreux autres facteurs écologiques et économiques. Les faiblesses des méthodes d'estimation sont les suivantes : ⁷⁶⁶

- Elles sont influencées par des facteurs tels que le prix de la location des colonies d'abeilles et de la vente des produits végétaux, qui dépendent à leur tour des règles du marché qui évoluent géographiquement et dans le temps.
- Le travail accompli par les pollinisateurs sauvages est ignoré ou sous-estimé.
- Les avantages des pollinisateurs pour les espèces végétales sauvages, qui sont nécessaires au maintien d'équilibres importants pour les agriculteurs, sont ignorés ou sous-estimés. Dans de nombreuses régions agricoles de la planète, où l'on cultive des arbres fruitiers dépendant des pollinisateurs, le nombre de ruches utilisées par hectare est généralement inférieur aux recommandations : on estime que 41% des ruches recommandées par hectare sont utilisées. ⁷⁶³ Ce chiffre permet de prévoir que la pénurie d'abeilles domestiques est compensée par la présence de pollinisateurs sauvages, dont il est difficile d'estimer la contribution économique.
- Des questions telles que les pertes d'emploi, la réduction de la disponibilité des nutriments et la réduction de l'autosuffisance alimentaire ne sont pas prises en compte.

Dans le monde entier, on estime que 71% des 100 espèces végétales qui fournissent 90% de la nourriture bénéficient d'une certaine manière de la pollinisation par les animaux, et en Europe, 84% des 264 espèces cultivées sont pollinisées par les animaux. ⁵⁸⁵ Dans les pays développés, on estime que la surface plantée de plantes nécessitant une pollinisation a augmenté de 17% entre 1961 et 2006. Selon une autre estimation, 75% des 115 principales cultures de la planète bénéficient de la pollinisation dans une certaine mesure. ⁶⁷⁶ La pollinisation par le vent ou l'autopollinisation est suffisante pour environ 28 cultures. Les cultures pollinisées représentent entre 6 et 12% de la production agricole (en quantité) mais 35% de la valeur marchande, car elles sont plus rentables que, par exemple, les céréales (qui ne nécessitent pas de pollinisation entomophile). ⁶⁷⁶

LA MONÉTISATION DU CAPITAL NATUREL EST RÉDUCTRICE ET DANGEREUSE : LES BIENS COMMUNS DOIVENT ÊTRE PROTÉGÉS

Les estimations sont toujours très approximatives car il est impossible de mesurer le capital naturel avec précision. ¹¹⁸⁹ Pour de nombreuses cultures, la contribution des pollinisateurs sauvages est inconnue, et pour certaines cultures, l'impact du service fourni par les insectes d'élevage est également inconnu. ⁷⁵³ On constate également que la méthode d'analyse appliquée est très anthropocentrique car elle ne tient pas compte des services naturels indispensables que la biodiversité fournit pour la survie de la planète et de l'agriculture. Il est difficile d'estimer cette valeur, mais il faut toujours se rappeler que la survie des écosystèmes est nécessaire au maintien d'une société humaine pacifique et équilibrée sur de longues périodes. Les estimations ne permettent pas non plus de quantifier tous les aspects économiques tels que les emplois. Par exemple, si les cultures utilisées pour produire des aliments pour animaux sont incluses dans les estimations, la valeur économique du service de pollinisation pourrait augmenter d'au moins un quart ; les avantages économiques générés par les pollinisateurs pour la production alimentaire sont sous-estimés, mais il s'agit tout de même de chiffres considérables.

Il est très réducteur et simpliste de se contenter de l'estimation de certains chercheurs selon laquelle, sans les pollinisateurs, nous sommes susceptibles de produire 10% de nourriture en moins pour les humains. Bien qu'il s'agisse d'une prédiction négative, elle ne donne pas la bonne

mesure de la gravité car elle ne tient pas compte des événements catastrophiques liés à l'effondrement de la biodiversité et des services de la nature. En même temps, il est nécessaire de souligner que le service de pollinisation actuel continue de montrer des signes de détresse, car les pollinisateurs sauvages et d'élevage sont en déclin : aux États-Unis, une réduction de 59% des abeilles domestiques a été enregistrée entre 1947 et 2005, et en Europe, une réduction de 25% entre 1985 et 2005.⁷⁵⁸ Ainsi, aujourd'hui, la demande de pollinisateurs par les secteurs de l'agriculture et de l'élevage dépasse l'offre naturelle et artificielle (apiculteurs). Si ce décalage entre la demande et l'offre de pollinisation n'est pas stoppé, une crise dangereuse et irréversible est facilement prévisible.

Un autre aspect difficile à estimer concerne la répartition dans la société, entre les différents groupes de revenus, des dommages causés par la réduction des pollinisateurs. Une étude menée au Brésil, l'une des régions agricoles les plus importantes au monde (par exemple, le café), a estimé que 68% des 53 principales cultures dépendent dans une certaine mesure des pollinisateurs (36 cultures sur 53). Cette dépendance est estimée à 74% au niveau mondial, à 84% en Europe et à 80% au Mexique. Au Brésil, l'une des cultures importantes est la canne à sucre, qui ne dépend pas des pollinisateurs. Au Brésil, 59% de la surface agricole est cultivée avec des plantes dépendant des pollinisateurs (par exemple, le soja et le café) et une réduction du service de pollinisation pourrait entraîner une baisse alarmante du PIB (produit intérieur brut) ; en outre, au moins huit millions de personnes travaillent dans le secteur de la production de café, qui nécessite une pollinisation.⁷⁵⁸ Dans ce pays, la réduction des pollinisateurs affecterait principalement les plus pauvres, notamment dans les zones rurales. Soixante pour cent des aliments consommés par les Brésiliens dépendent des pollinisateurs, et un tiers de la production mondiale de café provient de cette région. Ainsi, la préservation des zones naturelles, la réduction de la déforestation, la réduction de la fragmentation des habitats, la réduction de l'utilisation des pesticides (le Brésil est l'un des plus gros utilisateurs de l'herbicide glyphosate) et la préservation des pollinisateurs au Brésil aident la population locale mais aussi le reste de la planète.

Les plantes qui dépendent des pollinisateurs ne fournissent pas seulement de la nourriture, mais aussi des médicaments, des agro-carburants, des fibres, des instruments de musique et des matériaux de construction qui sont très importants. En outre, il existe également une valeur difficile à monétiser, comme celle de la santé mentale due aux avantages de vivre à proximité de zones vertes et de pouvoir profiter d'espaces de loisirs entourés de verdure.

La marchandisation des services fournis par la nature est très risquée et constitue une approche bienvenue des règles conçues par les économistes et les entrepreneurs, qui reposent sur certains principes anti-écologiques et autodestructeurs :

- interdit d'interdire ;
- tout a un prix ;
- tout bien naturel peut être acheté, privatisé et détruit ;
- les coûts environnementaux générés par les entreprises doivent être distribués à la communauté ;
- les catastrophes sont léguées aux générations futures ;
- il n'y a pas de limites écologiques.

UNE AUTRE VISION DU MONDE DOIT ÊTRE POSSIBLE

Dans ce livre, qui a débuté sous le prétexte de décrire le monde des abeilles, afin de mettre en évidence certaines catastrophes évidentes en cours (la disparition des abeilles), on a tenté de résumer une masse impressionnante de chiffres et de données à la fois éclairantes et facilement accessibles et incontestables. Le sentiment est que le changement lent mais inexorable et brutal vers lequel nous nous précipitons ne suscite pas les bouleversements, l'intérêt et le débat nécessaires. Le silence général est très inquiétant et en même temps surprenant, notamment parce qu'il n'y a pas beaucoup d'échappatoires possibles. Les personnes les plus riches peuvent espérer se réfugier dans des communautés luxueuses, loin des grandes villes où la souffrance risque d'être plus grande et de se révéler plus tôt.⁹⁷⁵ Fuir et se cacher des regards indiscrets n'est certainement pas la solution. Les formules tragiques comme le suicide ou le choix de ne pas procréer ne peuvent pas non plus être des solutions : comment penser à procréer en connaissant ces prédictions !

Nous devons faire face aux dynamiques qui tendent à conduire la société humaine à l'effondrement, mais nous devons essayer de ne pas être submergés par ce qui peut être considéré comme un déluge de mauvaises nouvelles. Des technologies étonnantes ont été créées, mais nous avons les mêmes émotions et institutions de l'âge de pierre que nous avons conservées depuis le Moyen Âge.

Nous nous approchons à grands pas d'une nouvelle réalité effrayante, un monde où nous redoutons l'arrivée de l'été, où nous sommes constamment en insécurité en raison de l'arrivée probable d'événements extrêmes (sécheresse, trombes d'eau, pénurie de ressources), où les villes, malgré leur haut degré d'artificialité, conservent davantage de biodiversité que les zones agricoles environnantes parce qu'elles sont désormais dévastées. Le changement climatique et l'écocide systématique des non-humains apparaissent comme des cauchemars terrifiants.

L'être humain égoïste, qui par choix se soumet aveuglément aux règles économiques, n'est plus naturel. *L'homo oeconomicus* a épousé la culture destructrice et autodestructrice du consumérisme et du capitalisme. Le nouveau monde que nous créons ne sera guère meilleur que celui que nous avons laissé derrière nous, et les retards dans la prise de décisions sont fatals. Le bien-être de la communauté dépend d'un bon état de conservation de la nature, qui ne peut descendre en dessous de certains seuils. Lorsque les limites sont dépassées, le niveau de sécurité sociale glisse vers des privations inacceptables. Nous sommes aveuglés et la capacité de l'humanité à agir a largement dépassé notre capacité à comprendre les conséquences de nos actes. Par conséquent, nous générons continuellement des problèmes nouveaux et plus graves, notamment parce que l'innovation technologique offre des moyens nouveaux et de plus en plus puissants de modifier la biosphère ; pensons aux nouvelles frontières de l'intelligence artificielle ou aux possibilités de modifier l'hérédité des espèces, y compris celle des humains, grâce à la biotechnologie. La crise n'est pas seulement environnementale mais aussi morale, culturelle, de coexistence civile et de démocratie.

L'attaque massive de la biosphère par l'homme entraînera un effondrement qui ne sera probablement pas soudain, mais plutôt progressif. Les changements négatifs progressifs mais imparables prévoient une fin triste et inexorable. Les effondrements partiels et isolés nous avertissent d'un probable effondrement systémique. L'anticipation et l'attente peuvent être plus douloureuses que l'événement extrême et final.

Le changement climatique, lorsqu'on l'examine attentivement et en perspective, peut être comparé à un état de guerre. Comme toute guerre, elle génère colère, désespoir, confusion, difficulté à prendre des décisions clairvoyantes et altruistes. Nous pouvons la définir comme la souffrance d'un désastre écologique, comme celle qui est vécue suite à la disparition d'un écosystème et de l'environnement dans lequel on a vécu (par exemple à cause d'ouragans,

d'inondations ou de désertification). Les migrants climatiques savent ce que c'est, un sentiment de désolation, de désespoir et de perte d'identité. Être triste après un événement catastrophique peut être considéré comme un signe de bonne santé mentale. La destruction de ce qui nous est cher peut nous rendre incapables de réagir, mais elle met en évidence un attachement positif à la Terre, ce qui pourrait nous sauver.

L'approfondissement de certains thèmes comporte un risque élevé pour l'équilibre mental, surtout si l'on n'est pas en mesure d'organiser une échappatoire par ses propres forces, comme peuvent le faire certains riches. La prise de conscience génère des tempêtes émotionnelles qui risquent de conduire au nihilisme. La connaissance combinée à l'impuissance décourage facilement. Si l'on ajoute à ces facteurs l'isolement, par exemple l'isolement intellectuel, il est difficile de ne pas sombrer dans la tristesse et les pensées négatives. Le fait d'être immergé dans des informations angoissantes au quotidien et d'être en même temps exposé à l'ignorance ou à l'apathie de la communauté qui nous entoure génère une prise de conscience de l'irréversibilité et de l'impuissance. Cette situation est souvent aggravée par le déni, l'indifférence ou l'hostilité de la part de ceux qui auraient les moyens intellectuels, sociaux et économiques d'agir, au moins au niveau local. Essayer de rester détaché et neutre, comme les scientifiques voudraient le paraître, est un signe de faiblesse et de méconnaissance de la gravité. Au contraire, le sentiment d'urgence, de préoccupation, doit être exprimé et il est important d'essayer de le transmettre. Dans de nombreuses stratégies de communication, comme certaines des stratégies scientifiques consultées pour rédiger ce texte, le détachement et la neutralité sont perçus comme déplacés, car les émotions sont indispensables dans un processus de communication efficace qui touche à l'une des questions les plus angoissantes que nous puissions imaginer : l'effondrement des services écosystémiques nécessaires à la santé de l'humanité.

Le temps passe, les événements se précipitent de plus en plus vite, et il devient irréaliste de penser à des solutions miraculeuses, surtout si l'on s'attend, à tort, à ce qu'elles soient proposées par quelques individus, tels que les politiciens et les administrateurs du bien public. C'est probablement un problème qui ne peut être résolu, comme la mort. Ce niveau d'acceptation et en même temps de compréhension est désarmant et déprimant. Se relever après avoir subi cette onde de choc est une tâche titanesque.

Nous devons inverser l'échelle des valeurs de la société, qui repose sur des règles artificielles, sous-produits de la culture humaine, qui accordent peu de valeur aux ressources naturelles telles que les matières premières (par exemple, le sol, le bois, l'eau), un peu plus aux produits transformés (industrie) et beaucoup aux produits virtuels tels que l'argent et la finance. Nous devons également inverser les priorités des valeurs car la valeur des ressources naturelles deviendra bientôt inestimable (par exemple, l'eau). Nous devons imiter la nature, en gardant à l'esprit que :

- Dans les écosystèmes, les déchets ne s'accumulent pas (pensons aux forêts comme un exemple simple de flux circulaire).
- La quasi-totalité de l'énergie utilisée est solaire, c'est-à-dire qu'elle provient de la photosynthèse. Elle est donc nécessairement locale, elle ne peut pas se déplacer sur de longues distances (sauf dans certains cas comme les océans et le cycle de l'eau).
- L'aide mutuelle, c'est-à-dire la symbiose, est essentielle à la réussite de la nature. Le principe de base de l'enrichissement personnel est perdant : malheureusement, nous avons épousé cette croyance pendant trop longtemps. Un appétit matériel illimité va à l'encontre du but recherché.
- La nature récompense la diversité : elle est plus stable et plus résiliente. Nous détruisons systématiquement et sans le savoir, non seulement le sauvage mais aussi le culturel.

Si nous continuons à ne pas faire face à la crise environnementale, nous nous retrouverons bientôt sans moyens pour y faire face. Se trouver au milieu d'un changement de cette ampleur et espérer vivre dans la dignité est au-dessus de nos forces.

Une mobilisation générale est nécessaire pour provoquer le nécessaire changement de point de vue. Peu de gens semblent avoir conscience que nous sommes entrés en guerre contre la nature et que nous sommes en train de la perdre. Nous détruisons la Terre, qui est notre foyer et notre avenir, comme si nous étions en guerre. Comme nous le ferions en temps de guerre, une mobilisation massive est nécessaire pour reboiser et arrêter le changement climatique. Nous devons organiser une grande transition, rapide et coordonnée. Parmi les ennemis qu'il faut sûrement combattre, il y a l'industrie pétrolière, le capitalisme et l'inaction des puissants. Avoir peur de la guerre et l'empêcher est un signe de bon sens et d'amour de sa propre vie et de celle des autres ; pour faire la guerre, c'est-à-dire être prêt à se sacrifier dans le but de réduire de 70% les émissions de gaz qui altèrent le climat, il faut être conscient de l'urgence. Malheureusement, la plupart des effondrements environnementaux actuels se déroulent lentement et ne génèrent pas le sentiment d'urgence et de danger nécessaire pour promouvoir une mobilisation égale à celle d'une guerre mondiale. De plus, notre système social hiérarchique délègue les décisions importantes aux autres. Cela crée facilement l'illusion que quelqu'un d'autre le fera pour nous, pour notre propre bien. L'organisation hiérarchique rigide de notre société est une aggravation de la catastrophe actuelle car elle favorise l'égoïsme (chacun pour soi) d'une part et l'indifférence (quelqu'un d'autre s'en occupera) d'autre part. En temps de crise, la coopération et la coordination au niveau local constituent une stratégie de défense efficace. La résilience en période de difficulté dépendra des relations humaines et, par conséquent, de liens très étroits.

S'arrêter pour agir afin de sauver la Planète, en l'absence du sentiment de danger immédiat, est la solution la plus simple. Ne pas agir aujourd'hui, c'est certainement ne pas pouvoir éviter la violence demain : la crise écologique apportera l'insécurité, la pauvreté, les conflits, le chaos pour tous, mais le déclin et la misère aussi pour les riches et les puissants de la Planète. Le niveau de vie en Europe est soutenu par l'équivalent de plusieurs centaines d'esclaves énergétiques (au moins 400). Cela signifie que chacun d'entre nous utilise une quantité d'énergie équivalente à la force de travail de centaines de personnes, altérant de manière irréversible la biosphère et utilisant des ressources limitées telles que le pétrole. Si, comme on peut le prévoir, les esclaves énergétiques (les combustibles fossiles) diminuent, disparaissent ou ne peuvent plus être utilisés, notre niveau de vie devra nécessairement changer. Pour survivre, nous devons nous adapter à un travail difficile comme l'agriculture.

Le changement climatique peut nous surprendre de manière négative : les Italiens peuvent aussi devenir des migrants climatiques et demander l'asile ailleurs. Supposons que 50% de la population soit obligée de trouver un nouveau logement, les autres 50% devront nécessairement l'accueillir. Nous sommes tous des migrants potentiels. L'aide mutuelle et l'altruisme, en temps de crise, sont des stratégies gagnantes, également adoptées par de nombreux exemples de non-humains. Les écologistes de profession enseignent que les groupes altruistes battent les groupes égoïstes. La société basée sur la compétition et l'accumulation de biens au-dessus des besoins réels est un échec, d'autant plus lorsque les ressources sont rares. L'union fait la force : une meilleure mesure de la richesse pourrait être le nombre de personnes en qui j'ai confiance et qui sont prêtes à m'aider dans les moments difficiles. Les liens et le réseau de solidarité seront de plus en plus importants dans un système voué au déclin. La sagesse et la solidarité sont nécessaires.

J'ai passé la plupart de mon temps à approfondir ces questions angoissantes dans la solitude, derrière un écran et en consultant des textes, en partie parce que l'environnement qui m'entoure n'est pas réceptif, et parfois même je le perçois comme hostile. Lorsque j'ai essayé de discuter de ces questions, je me suis retrouvé parmi des personnes qui ne veulent pas savoir, qui refusent de croire, ou qui me considèrent comme irrationnel, un rabat-joie, un annonciateur de malheurs qui ne sont pas réels ou qui sont très lointains. Il n'est pas facile d'essayer de prédire que, bientôt, il ne sera plus possible de voyager en avion ou d'acheter de la nourriture à l'autre bout du monde, ou que la voiture privée deviendra un bien de luxe ; ces prédictions sont

considérées comme inconfortables et dérangeantes, loin de l'imagination dominante. Parler des prédictions évidentes d'effondrement est presque impossible, on est constamment censuré. Le matérialisme, la compétition et l'égoïsme prévalent.

Le désert intellectuel, la superficialité et l'ignorance que j'ai souvent perçus ont été des facteurs essentiels dans l'écriture de cet ouvrage. Partager la douleur de la catastrophe écologique, dans ce cas avec la communauté dans laquelle on vit, aurait pu apporter un soulagement, créer un sens commun et encourager l'organisation d'actions concrètes. L'espoir ne doit pas être perdu, même s'il peut être ému. L'espoir ne doit pas s'accompagner de passivité, il doit aider à construire des projets et à imaginer un avenir différent et meilleur.

L'un des moments les plus difficiles est la confrontation avec les jeunes, avec les étudiants, les travailleurs de demain. Ils écoutent et demandent : que pouvons-nous faire ? Pourquoi ne faisons-nous pas le nécessaire pour éviter ces catastrophes ?

Un point de vue de plus en plus évident, dans une société ancrée dans un consumérisme effréné depuis des décennies, représente bien la perception de l'avenir par certains adultes : élever des enfants dans cette société est un acte égoïste car ils sont destinés à souffrir. Les jeunes, lorsqu'ils auront pris pleinement conscience de la réalité, pourront nous dire : « vous avez épuisé la plupart des ressources de la planète, vous avez exterminé presque toutes les espèces vivantes, et la pollution, en plus de détruire la biosphère, génère des maladies et des souffrances inacceptables ».

Un choix pour la préservation de l'équilibre mental pourrait être d'épouser l'ignorance volontaire individuelle. L'ignorance de masse pourrait également être encouragée. Dans ce dernier cas, elle pourrait être programmée par l'État qui propose des systèmes d'information, d'éducation et de formation du public qui n'abordent pas les sujets considérés comme gênants.

La liberté de choix de ne pas procréer par certains est perçue comme une solution individuelle allant dans le sens d'actions éco-responsables pour sauver la Planète. La croissance démographique et le rythme encore plus rapide de la dégradation de la planète sont des questions cruciales qui devraient être traitées dans un contexte collectif, mais la société n'est peut-être pas prête à aborder des questions aussi sensibles et privées. Que dirions-nous à nos enfants lorsque nous devrons inévitablement en parler ? Comment avons-nous choisi le bien-être d'une génération au détriment de la suivante ? Nous devons expliquer que nous n'avons pas été capables d'écouter les messages que la nature et le monde dans lequel nous vivons nous crient depuis longtemps. Notre insouciance et notre voracité nous ont aveuglés : nous assistons à l'écocide, à l'extinction massive des non-humains, sans nous en soucier, avec une indifférence affligeante. Nous devons imaginer et construire une société différente, meilleure, où nous aimerions vivre et où nous espérons que nos enfants pourront vivre. Il n'y a pas de solutions simples ou de recettes toutes faites, il faut tout inventer courageusement en écoutant la nature.

FAIRE DU NEUF AVEC LE VIEUX ET IMITER LA NATURE

LES SIGNAUX NOUS ONT AVERTIS DEPUIS UN CERTAIN TEMPS

Pour chacun des facteurs anthropiques qui génèrent des impacts négatifs sur la biodiversité ou la capacité à produire des aliments, il est facile d'imaginer des solutions. La propagation de la durabilité au cours des prochaines décennies, au niveau planétaire, dépendra principalement de la forme que prendra l'agriculture. Malheureusement, les pénuries alimentaires sont facilement prévisibles et peuvent être attribuées à l'avidité et à l'individualisme de l'espèce humaine, pour lesquels les solutions pacifiques ne sont pas faciles. La loi économique de l'exploitation illimitée des ressources naturelles et de la main d'œuvre mène à coup sûr à l'effondrement.³⁶ Parmi les facteurs qui ont déjà été largement évoqués figurent l'agriculture chimique, la perte de biodiversité, la réduction de la fertilité des sols, le changement climatique (par exemple, les sécheresses, les phénomènes météorologiques extrêmes) et la propagation des espèces exotiques. Les pratiques d'élevage non durables comprennent également l'apiculture industrielle avec le nomadisme, l'utilisation de médicaments, la sélection et l'alimentation artificielles.

La mortalité accrue des abeilles et des insectes en général (pollinisateurs et non pollinisateurs) entraîne une réduction de la capacité à produire de la nourriture : à long terme, la quantité et la qualité diminueront et les possibilités de choix seront réduites.

Il existe de nombreuses estimations de la quantité de nourriture qui dépend du service des abeilles, qui est d'ailleurs bien rémunéré dans de nombreuses régions du monde. Selon certaines estimations, les abeilles domestiques sont responsables de la pollinisation de 71 des 100 principales espèces utilisées pour la consommation et génèrent une valeur de plus de 200 milliards de dollars (entre 200 et 400 milliards de dollars).¹⁹⁸ Certains chercheurs avancent que la valeur de la pollinisation par les abeilles élevées peut être estimée à environ 60 fois celle de la somme de tous les produits des abeilles.¹⁹⁹ Il est difficile de prévoir ce qui se passera si les abeilles sont réduites de manière drastique, mais la sécurité alimentaire sera certainement fortement compromise. La mortalité accrue des abeilles est l'une des nombreuses sonnettes d'alarme qui signalent les mauvais choix, mais nous continuons à les répéter. Les problèmes de l'apiculture constituent un signal d'alarme très préoccupant, et la seule solution possible est la recherche d'un meilleur équilibre entre les intérêts économiques, les limites biologiques et physiques de la planète, et l'indispensable fonctionnalité des services de la nature. La réponse est donc la diffusion de l'agriculture durable.⁶⁰⁹ Le danger pointé du doigt par les apiculteurs s'accompagne de nombreux autres plus inquiétants, tels que la pollution de l'air et de l'eau, la réduction de la biodiversité, le changement climatique et la perte de fertilité des sols.

Aucune autre preuve n'est nécessaire. Nous avons des informations qui ne laissent aucun doute. Néanmoins, une sorte de contagion sociale est en cours, impliquant de manière inquiétante des scientifiques et des experts dans les différents domaines incriminés. Il s'agit d'une forme d'épidémie qui détourne l'attention des faits (gênants ou effrayants, selon le point de vue) vers des fantômes inaccessibles, tels que les causes nouvelles et inconnues de l'augmentation de la mortalité des abeilles ces dernières années (voir *Colony Collapse Disorder*). Il n'est pas nécessaire de découvrir de nouveaux facteurs, nous en savons

suffisamment pour expliquer la catastrophe écologique en cours et tous peuvent être liés à l'action de l'homme.^{36, 529}

Prendre des mesures compensatoires pour contrer le déclin de la présence des pollinisateurs est devenu une priorité pour le système agricole et au-delà. L'utilisation de pesticides, la destruction, la fragmentation et l'isolement des habitats naturels ont rendu la survie des insectes très difficile. L'une des meilleures mesures compensatoires consiste à consacrer une partie de la zone agricole à des fleurs sauvages annuelles et pluriannuelles. La reforestation et la création de zones semi-naturelles facilitent la restauration des équilibres éco-systémiques qui ont été détruits par l'agriculture chimique. Plusieurs cultures ne sont possibles que grâce à la présence de zones sauvages ou semi-naturelles à proximité, qui permettent aux pollinisateurs sauvages de rendre leur service utile, comme c'est le cas pour le noyer brésilien ou le cacao.

Nous sommes entrés dans une ère que l'on a appelée l'*Anthropocène*, mais pour mieux représenter le désastre que nous générons, nous pouvons suggérer que nous entrons dans l'*Eremocène* : l'ère de la solitude, dans laquelle les êtres humains ne seront plus entourés que des quelques espèces qu'ils ont élevées ou cultivées pour leur propre survie. Même cette vision est optimiste car l'homme ne peut pas vivre sans les animaux sauvages et la présomption de pouvoir décider avec quels êtres vivants partager la planète crée des déséquilibres qui conduiront également à l'effondrement de la société humaine. Les solutions possibles doivent être partagées dans le cadre d'un dialogue sérieux mais difficile avec les acteurs économiques puissants qui dictent pratiquement les règles aujourd'hui : l'industrie chimique, la biotechnologie, la sélection végétale (semences) et les producteurs de combustibles fossiles et de dérivés (par exemple, les plastiques, les voitures).

En conclusion, il est difficile d'imaginer que l'espèce humaine mourra de faim si seulement les abeilles élevées venaient à disparaître, mais nous pouvons supposer de façon réaliste que les changements qui génèrent une mortalité accrue des abeilles et des pollinisateurs sauvages causeront de graves problèmes pour la biosphère et, par conséquent, pour la communauté humaine.

LA TRAGÉDIE DES BIENS COMMUNS

Les espèces qui fournissent plus de 90% de la nourriture sont moins de 15, elles sont le résultat de sélections artificielles, ne peuvent être reproduites par les agriculteurs et sont protégées par des règles anti-écologiques qui permettent de privatiser la nature. Ainsi, les denrées alimentaires sont monopolisées par des brevets, sont stériles ou ne peuvent plus survivre sans le soutien de l'industrie chimique et de la mécanisation, c'est-à-dire des combustibles fossiles. Avec le brevetage des semences, le droit des agriculteurs de les conserver et de les partager est considéré comme un vol, c'est-à-dire comme un crime contre la propriété intellectuelle. Il suffit de pouvoir modifier un gène dans une plante pour qu'une grande entreprise puisse revendiquer une protection et des droits commerciaux qui produiront d'énormes profits au détriment de la communauté et de l'avenir. Les agriculteurs ne peuvent plus conserver les semences, car cela devient un crime, mais il y a pire. Si le pollen de plantes génétiquement modifiées transmet des caractéristiques brevetées à des cultures non OGM (par exemple par le vent), les agriculteurs risquent d'être poursuivis en justice par les entreprises qui détiennent les droits de propriété : cela s'est déjà produit.¹⁷⁵ Dans un monde plus juste, ce serait le détenteur du brevet qui devrait payer une compensation pour la contamination génétique de cultures initialement non génétiquement modifiées. En d'autres termes, les grandes entreprises de biotechnologie sont autorisées à prendre le contrôle de champs plantés de plantes non génétiquement modifiées.

La biotechnologie a ouvert la voie à de nouvelles formes de colonisation dont les effets dévastateurs sont similaires à ceux d'une véritable guerre. Les agriculteurs sont transformés en criminels parce qu'ils volent (contre leur gré) des gènes brevetés et sont contraints de verser une compensation aux géants de la biotechnologie. En réalité, le bon sens et l'un des principes de base de la protection de l'environnement - le pollueur-payeur - sont renversés, car dans ce cas, c'est le pollueur qui est payé. Les effets irréversibles incluent une réduction de la biodiversité, ainsi qu'une augmentation de l'insécurité alimentaire et de la pauvreté. En l'absence d'un système efficace de protection collective, tel que celui qui devrait être mis en œuvre par les administrations publiques et les hommes politiques, la désobéissance civile pourrait être une solution. La foi erronée dans l'obéissance à des lois injustes continuera à répandre la pauvreté, la faim et finalement l'esclavage. Les semences devraient être protégées par un véritable "droit" en tant que système vivant qui doit être libre et disponible pour la communauté, sans menace d'extinction par stérilisation biotechnologique ou contamination génétique.

Les entreprises de biotechnologie ont réussi à bien organiser leurs plans de profit à de nombreux égards, qui sont brièvement mentionnés ici, comme l'absence de possibilité pour les consommateurs de savoir quels aliments sont utilisés dans quels produits dérivés d'organismes génétiquement modifiés : pensons aux dérivés du soja, comme la lécithine, qui est un émulsifiant présent dans le chocolat, les glaces et de nombreux autres produits, ou l'huile de soja, qui est probablement l'huile végétale la plus utilisée dans le monde, et les aliments pour animaux. Il est presque impossible, pour la plupart des produits alimentaires, de connaître tous les ingrédients utilisés (par exemple, le vin, le fromage, les confiseries, les glaces), de savoir d'où proviennent les ingrédients utilisés ou de disposer d'informations sur la protection des travailleurs et de l'environnement adoptée par les entrepreneurs. Pourquoi ne pas également rendre publics les pesticides utilisés dans chaque lot, sol et exploitation ?

Les stratégies adoptées par les entreprises de biotechnologie sont fondées sur une vision déformée de l'ensemble du système capitaliste. Les droits de propriété et d'extraction sont protégés comme s'ils étaient naturels, et seuls les propriétaires des grandes entreprises en bénéficient.⁸⁴⁵ En conséquence, le pouvoir destructeur des multinationales, qui sont aujourd'hui économiquement plus fortes que des nations entières, ne peut être endigué. La condition bien connue de la *tragédie des biens communs* a été créée. Lorsque les affaires publiques deviennent une entreprise gérée selon des critères privés, l'arrogance, la ruse et, finalement, la loi du plus fort l'emportent. Dans ce modèle, l'État devient un ennemi ou un sujet à corrompre.

Il est de plus en plus évident que nous devons repenser les lois humaines et leur relation avec la nature, car la connaissance scientifique est utilisée pour dominer la nature et contrôler les êtres humains, tandis que la loi est de plus en plus conçue pour protéger la liberté d'extraction de quelques-uns. Au lieu de protéger les services indispensables que la nature nous offre, nous avons protégé le droit de la piller. Grâce à l'organisation d'un système juridique, remontant au moins à l'époque romaine, qui défend la propriété privée, la liberté de s'approprier et de détruire des choses qui sont nécessaires à tous et qui devraient au contraire être considérées comme la propriété de tous a été affirmée. Une alliance de facto s'est formée entre l'intérêt privé et le pouvoir public. Les administrateurs de l'État, par le biais de la politique, peuvent privatiser les biens communs, en transférant du secteur public au secteur privé des ressources qui sont fondamentales pour la survie de tous. Ce processus a créé un déséquilibre, à savoir un flux constant et irréversible de ressources publiques vers quelques mains privées. Aujourd'hui, il est très clair que le pouvoir public est incapable de contrecarrer la possibilité pour les multinationales d'acquérir le contrôle des ressources humaines et naturelles à volonté et partout. Nous devons repenser la relation entre l'homme et l'environnement, car nous nous considérons actuellement comme les maîtres de la nature et non comme une partie (non essentielle) de celle-ci. Laisser la sécurité et la souveraineté alimentaires entre les mains de quelques puissants entrepreneurs est une imprudence qui coûtera cher.

Tant que le système restera conditionné par quelques intérêts privés et que la connaissance et l'information sur des sujets aussi stratégiques et vitaux seront monopolisées par quelques grands acteurs, il sera impossible de concevoir une société avec moins d'inégalités et plus de paix. Si nous laissons les supermarchés libres de penser à nous, ils le feront, mais selon des principes commerciaux et financiers non démocratiques. Certains aspects utiles pour encourager un comportement plus durable sont souvent opposés, comme par exemple : ⁷⁴⁹

- La diffusion d'informations sur les ingrédients utilisés et leur origine.
- La diffusion d'informations sur les éco-garanties.
- La diffusion de garanties sur la protection de la santé et de la dignité des travailleurs.
- Privilégier les aliments locaux et de saison dans la mesure du possible.
- Réduire la consommation de produits animaux.
- Réduire l'utilisation des emballages.
- Ne pas soutenir avec des fonds publics des stratégies nuisibles à l'environnement et à la santé, comme les subventions aux agro-carburants et à la production d'OGM ; ne pas financer des systèmes anti-écologiques comme les plantes stériles ou les agro-technologies qui augmentent l'utilisation de combustibles fossiles et de pesticides. ⁷⁴¹ Les énergies fossiles bénéficient d'énormes subventions : probablement entre 6 et 7% du PIB mondial. ⁷⁷⁶ Il convient de rappeler ici que les cinquante plus grandes entreprises de combustibles fossiles sont responsables de la moitié des émissions industrielles mondiales de gaz à effet de serre. Les 20 pays les plus industrialisés du monde ont généré plus de deux tiers de l'ensemble des émissions mondiales. En théorie du moins, il suffirait d'agir sur un nombre relativement faible d'entreprises privées et de gouvernements pour provoquer de grands changements. Par ailleurs, certaines des entreprises les plus importantes sont, au moins en partie, des entreprises d'État. Nous pourrions faire valoir qu'un accord international sur la réduction de l'utilisation des combustibles fossiles est nécessaire pour mettre fin au changement climatique et à l'agriculture non durable. Nous ne pouvons pas autoriser la combustion des réserves connues, car avant qu'elles ne soient épuisées, nous aurons transformé la planète en un lieu inhospitalier.
- Faire du principe du pollueur-payeur une réalité sérieuse. Ne pas payer pour le coût des dommages environnementaux est une subvention indirecte très généreuse et inintelligente. Il convient d'augmenter la taxation et les mesures dissuasives pour la pollution, comme l'utilisation de pesticides et de combustibles fossiles.
- Les systèmes d'eau de valeur, la régénération des sols, la composition chimique de l'atmosphère, la richesse de la diversité écologique, la photosynthèse, pour n'en citer que quelques-uns. Notre société connaît une crise environnementale bien plus importante que la crise économique actuelle et, par conséquent, la catastrophe environnementale aura un impact de plus en plus évident, non seulement sur la sécurité sociale et la santé, mais aussi sur les comptes économiques et financiers. Il est donc nécessaire d'attribuer des valeurs (monétaires, éthiques, morales, écologiques) au capital naturel et de le protéger de la dégradation.
- Examiner l'empreinte écologique des biens et des services, les comparer et éliminer tout le superflu. L'empreinte énergétique, l'empreinte hydrique, la consommation de terres et le bilan énergétique sont quelques-unes des questions écologiques qui devraient être sérieusement abordées de manière systématique pour chaque activité humaine, en particulier celles qui polluent le plus et sont inutiles. ³⁶
- Considérer les coûts de santé générés par les catastrophes environnementales et les compromis politiques tels que ceux concernant l'utilisation des pesticides et des combustibles fossiles (par exemple, en Chine, les coûts de santé générés par l'utilisation de centrales électriques au charbon s'élèvent à 5% du PIB). ⁶⁸⁰

- Rendre les publications scientifiques gratuites. Très souvent, les publications scientifiques sont accessibles moyennant paiement, mais la recherche scientifique qui est financée, même partiellement, par des ressources publiques devrait être accessible à tous.
- La plupart des résultats de la recherche scientifique ne sont pas pris en compte par les hommes politiques ou les agriculteurs, qui sont pourtant parmi ceux qui pourraient le plus contribuer au changement nécessaire. Par conséquent, la diffusion, dans un langage compréhensible et à un coût abordable, devrait être soutenue beaucoup plus fortement.

Probablement, pour la première fois dans l'histoire de l'humanité, de grandes entreprises privées, c'est-à-dire des armées de dizaines de milliers de travailleurs situés dans tous les points économiquement stratégiques de la planète, sont capables de soumettre des nations et des continents entiers. Il arrive, entre autres, que des groupes de travailleurs bien organisés et formés, représentant les intérêts de quelques dizaines d'entrepreneurs, très souvent sans le vouloir, mènent et gagnent une guerre contre la nature et la majorité restante de l'humanité. Quelques entrepreneurs décident du sort de producteurs, de distributeurs, de commerçants et de consommateurs sur des continents entiers. En fin de compte, ils sont capables d'influencer, voire de contrôler, la souveraineté et la sécurité alimentaire de la majorité d'entre nous, en particulier ceux qui vivent dans des pays où moins de 10% de la population est impliquée dans l'agriculture. C'est une guerre dans laquelle les perdants sont les nouveaux pauvres, les affamés, les assoiffés, les réfugiés climatiques, les malades de l'environnement. Pourtant, une petite augmentation du revenu des plus pauvres générerait une augmentation bien plus significative du bien-être qu'une augmentation du revenu des personnes déjà riches.

Malheureusement, il s'agit d'un conflit à l'échelle planétaire, que l'on pourrait comparer à une guerre mondiale, dont les effets dévastateurs s'amplifieront avec le temps et généreront de bien tristes répercussions pour les générations futures. Il existe une nette disparité des forces en présence entre ceux qui ont intérêt à manipuler l'environnement ou qui y sont indifférents, et ceux qui s'engagent activement dans la défense des biens communs. Il faut beaucoup plus de défenseurs des biens communs pour espérer obtenir les résultats nécessaires. Il est désarmant de mesurer l'incapacité de la société humaine à limiter son pouvoir d'autodestruction : actuellement, les intérêts de quelques-uns prévalent au détriment de la communauté.

HORREURS DES RAPPORTS JUDICIAIRES SUR LES DOMMAGES BIOLOGIQUES CAUSÉS PAR L'ARSENIC

En 2011, un fait divers a été enregistré qui souligne l'impossibilité de limiter la liberté de ceux qui portent atteinte à la communauté et aux biens communs. Dans certaines municipalités de la province de Viterbo, des valeurs élevées d'arsenic ont été relevées, c'est-à-dire supérieures à la valeur d'exemption (20 µg/L).³⁶ En même temps, des retards ont été signalés dans la construction ou la mise en service d'installations destinées à réduire les concentrations d'arsenic. En 2011, un dossier a été ouvert contre des inconnus par le parquet de Viterbo, et des enquêtes ont été ordonnées par le parquet de Velletri, en raison de la présence d'arsenic au-dessus des limites autorisées dans l'eau destinée à la consommation humaine. Au niveau judiciaire, le manque de transparence dans la divulgation d'informations à la population a également eu des conséquences. Le 22 janvier 2012, le tribunal administratif régional du Latium a jugé que le ministère de l'environnement et le ministère de la santé devaient verser des indemnités aux citoyens des municipalités des régions concernées (Latium, Lombardie, Toscane, Trentin-Haut-Adige et Ombrie). Dans ces régions, de l'eau destinée à la consommation humaine contenant de l'arsenic à des concentrations supérieures à celles autorisées par la dérogation a été distribuée. La compensation a été fixée à 100 euros, par personne desservie par l'aqueduc incriminé, pour un total d'environ 20.000 euros.⁸⁸⁷ L'arrêt cite :

"La faute constituée par l'exposition des usagers du service de l'eau à un facteur de risque, imputable, au moins en partie, en termes d'ampleur et de moment de l'exposition, à une violation des règles de bonne administration, donne lieu à un préjudice moral qui peut être indemnisé globalement, au titre du préjudice biologique, immatériel et existentiel, pour la probabilité accrue de contracter des maladies graves à l'avenir et pour le stress psychophysique et l'altération des habitudes de vie personnelles et familiales résultant de l'information tardive et incomplète sur le risque sanitaire. "

L'arrêt revêt une importance considérable et particulière car il condamne l'administration publique pour le seul risque sanitaire. Cependant, l'évaluation "économique" du dommage à la santé dans ce cas est clairement trop faible, et certainement insuffisante pour constituer un élément dissuasif. Par ailleurs, les commentaires suivants surgissent spontanément :

- 1) aucune personne physique de l'administration publique n'est identifiée comme étant responsable du dommage ;
- 2) la compensation financière est financée par les utilisateurs/citoyens eux-mêmes, à leur insu et de manière invisible ;
- 3) la somme de 100 euros pour indemniser les personnes qui ont été exposées à l'arsenic souligne à quel point le système est déséquilibré en faveur des intérêts privés à court terme.

L'EXPLORATION DE NOUVELLES SOLUTIONS EST UNE NÉCESSITÉ

Les règles dominantes de l'économie et du marché sont fondées sur plusieurs principes erronés :

- si on consomme ce que l'on produit, c'est comme si on ne l'avait pas produit ;
- il est essentiel de privatiser les profits et de socialiser les pertes ;
- reporter la solution de la crise écologique aux générations futures.

Certains des effets immédiats sur les agriculteurs sont l'endettement et le fait de ne plus pouvoir acheter les produits cultivés sur leurs propres terres ; ils sont également contraints de vendre le fruit de leur travail d'une manière prédéterminée par quelqu'un d'autre. Il en résulte un paradoxe : la moitié des personnes qui souffrent de la faim sont des agriculteurs et ceux-ci multiplient les gaspillages, comme l'utilisation de plus de 10 kilocalories de céréales pour obtenir une kilocalorie de viande, ou l'occupation de terres pour produire des agrocarburants ou des agroplastiques.^{36, 165, 741} Dans de nombreux cas, il est judicieux d'affirmer que le retour aux anciennes coutumes et pratiques constituera un pas en avant vers la durabilité et la résilience.

Les lois antidémocratiques encouragent la faim et la malnutrition et doivent donc être combattues, avant que des conditions environnementales et sociales apocalyptiques ne soient inévitablement créées. La crise écologique portera atteinte à l'humanité ainsi qu'à la planète. Il est préférable d'arrêter avant cela.

La société semble être entrée dans un tunnel sans issue, surtout si les combustibles fossiles sont utilisés jusqu'au point d'effondrement environnemental, ce qui pourrait arriver plus tôt que nous ne l'imaginons et certainement bien avant la fin des réserves souterraines connues de combustibles. Certaines conséquences prévisibles seront les suivantes :

- la taille de la population sera réduite ;
- nous reviendrons à vivre comme nous le faisons il y a au moins un siècle ;

- la paix et la sécurité sociale deviendront précaires.

À long terme, nous créons les conditions d'une réduction drastique du nombre d'individus de notre espèce et du nombre de personnes qui pourront mener une vie décente. Nous devons nous concentrer sur un point fondamental : l'exploration de nouvelles solutions n'est pas un caprice mais une nécessité.

S'il est vrai que de nombreux obstacles restent dans notre esprit, d'autres semblent objectivement insurmontables. Il est fort probable que les difficultés générées par la crise écologique, économique et sociale dans laquelle nous sommes plongés nous obligeront à nous pencher sérieusement sur les principes d'une agriculture écologique et donc dépendante de la nature. Nous allons probablement réévaluer les pratiques agricoles qui sont aujourd'hui considérées comme obsolètes parce qu'elles ont été adoptées il y a plus d'un siècle. Il ne faut pas oublier que la quantité de nourriture produite, par mètre carré et par calorie utilisée, était incomparablement plus élevée dans les jardins maraîchers parisiens des années 1850 que dans les fermes modernes. L'efficacité était beaucoup plus grande, mais l'inconvénient n'était pas négligeable : seule une petite fraction de la population pouvait effectuer un travail intellectuel ou un travail autre que la production alimentaire.

La diversification de l'écosystème agricole présente des avantages pour l'environnement mais aussi pour les agriculteurs, car la production devient plus résistante au changement et moins dépendante de ressources externes telles que les pesticides et l'énergie. L'utilisation de différentes stratégies de manière appropriée peut permettre une production agricole plus durable et, en même temps, assurer la rentabilité nécessaire.

Les politiques agricoles doivent encourager l'application de méthodes et de pratiques durables dans la production alimentaire. Les incitations pourraient être modulées en fonction de l'intensité de l'adoption des critères proposés. Un exemple de modèle proposé en Angleterre (*Environmental Stewardship*) est donné, qui implique principalement trois niveaux d'adoption de pratiques agricoles durables, avec différentes formes d'incitations.⁶⁶¹ Parmi les pratiques agronomiques encouragées, il y a celle qui consiste à laisser des bandes semées de fleurs sauvages (annuelles et pluriannuelles), d'au moins 6 mètres de large, en bordure des champs, et des interdictions ou des restrictions de l'utilisation de pesticides et d'engrais sont prévues.^{612, 660}

LA BIODIVERSITÉ DANS LES ENVIRONNEMENTS URBAINS

Les premières villes, comptant plus de 50.000 habitants, ont probablement été construites après 6000 avant Jésus-Christ. En 2011, plus de 1.400 villes avaient une population d'au moins un million d'habitants, et 22 villes comptaient plus de dix millions d'habitants : au XIXe siècle, seule la ville de Londres comptait un million d'habitants. Aujourd'hui, les zones urbaines de la planète occupent environ 3% de la surface terrestre mais abritent plus de 50% de la population mondiale et cette concentration devrait augmenter selon de nombreuses prévisions. Selon certaines études, la migration des zones rurales vers les villes implique une augmentation de plusieurs fois la consommation de ressources par habitant.⁹⁸⁰ Les environnements agricoles, notamment dans certains pays où la monoculture industrielle est la norme, sont tellement dégradés que l'apiculture devient difficile, voire impossible, et que les espèces sauvages n'existent plus. En général, l'environnement urbain n'est pas non plus propice à la survie des espèces sauvages.

Les villes ont une forte empreinte écologique, dépassant même cinq hectares par habitant, et sont à l'origine de la plupart des émissions de dioxyde de carbone de la planète.⁹⁷⁸ La séparation entre l'homme et la nature dans les villes atteint son expression maximale, ce qui se manifeste également par une consommation excessive de ressources au-delà de ce qui est nécessaire pour assurer une qualité de vie élevée. Depuis des générations, la vie dans l'environnement urbain est

déconnectée de la nature, ce qui favorise un manque d'attitude et de sensibilité à l'égard de sa préservation.

Au sein des zones urbaines, il peut y avoir de nombreux espaces dédiés aux espaces verts tels que des jardins publics et privés, des jardins botaniques, des installations sportives et des potagers urbains. Beaucoup de ces zones artificielles sont peu intéressantes du point de vue de la biodiversité, comme les pelouses des jardins privés ou les installations sportives. Les jardins botaniques situés dans de petites zones peuvent présenter des niveaux de biodiversité bien plus élevés que les environnements agricoles environnants, mais ils sont limités et artificiels. L'augmentation des espaces verts publics génère divers avantages pour la faune et la flore, mais aussi pour la santé physique et psychologique des habitants. Dans certains cas, la verdure urbaine, étant très souvent le résultat de projets déconnectés de la nature environnante, favorise des problèmes tels que la propagation d'espèces invasives. Dans certains cas, elle favorise également les problèmes de santé d'une partie de la population, comme les allergies (dues au pollen, par exemple).

L'état artificiel des environnements urbains favorise la présence de quelques espèces adaptées aux conditions écologiques artificielles, comme les souris, les moustiques ou les moineaux. Dans certains cas, ces espèces peuvent être porteuses de maladies, comme le virus du Nil occidental, qui est transmis par les moustiques (par exemple, le genre *Culex*) et est porté par certains oiseaux (par exemple, *Passer domesticus*), qui favorisent sa propagation par la migration (par exemple, aux États-Unis).⁹⁷⁸

Les conditions dans les environnements urbains peuvent favoriser certaines espèces, comme les chauves-souris, qui profitent de la lumière artificielle pour attirer les insectes dont elles se nourrissent. L'éclairage artificiel peut modifier les cycles de certaines espèces nocturnes, comme cela a été constaté pour les grenouilles et certains oiseaux.

Les températures dans les villes sont en moyenne plus élevées que celles de la campagne environnante, ce qui explique également l'attrait de certaines espèces, comme les étourneaux, qui en profitent pour dormir au chaud. D'autres sont attirés par les énormes quantités de nourriture disponibles dans les décharges, comme les mouettes.

En général, l'environnement urbain favorise quelques espèces comme les mouettes, les pies, les corbeaux, les merles, les rongeurs, les renards et quelques espèces d'insectes (par exemple, les mouches, les moustiques, les punaises de lit). L'examen des fèces ou du contenu du tube digestif de certains animaux urbains confirme que la plupart des aliments, par exemple ceux des goélands et des renards, sont d'origine anthropique (déchets, par exemple).

Les environnements urbains situés à proximité des zones naturelles peuvent être une cause majeure de mortalité. Par exemple, le transport routier est une cause majeure de mortalité pour des animaux tels que le renard, le hérisson, le coyote, le tatou et le cerf de Virginie.⁹⁷⁸

La lutte chimique est utilisée pour combattre la propagation de certaines espèces considérées comme nuisibles, telles que les rongeurs et les insectes (par exemple, les moustiques). L'utilisation de poisons tels que les pesticides ou les rodenticides pose également des problèmes aux espèces non ciblées. Les rodenticides nuisent aux oiseaux, notamment à certains oiseaux de proie, et à d'autres mammifères comme les coyotes, les lynx, les écureuils, les cerfs et les hérissons. Dans le cas des coyotes, des études montrent qu'après les accidents de la route, l'empoisonnement par des rodenticides est la deuxième cause de décès en milieu urbain.

⁹⁷⁸ On sait peu de choses sur les effets sublétaux et synergiques. L'utilisation de pesticides a également entraîné des problèmes pour des espèces non ciblées comme de nombreux oiseaux : le milan royal (*Milvus milvus*) empoisonné par les carbamates (en France), le pigeon ramier (*Branta bernicla*) et la bernache du Canada (*Branta canadensis*) empoisonnés par le diazinon aux États-Unis (en raison de leur distribution dans les prairies de New York). Les herbicides ont également eu des effets négatifs sur la faune. Des molécules telles que l'atrazine et le glyphosate

ont produit des effets létaux et sublétaux (démasculinisation) chez les amphibiens (par exemple les grenouilles).⁹⁷⁸

Un autre phénomène négatif enregistré dans les environnements urbains est le dommage causé par les animaux domestiques qui sont souvent abandonnés et adaptés pour vivre dans un état semi-sauvage, comme les chats. Des centaines de millions de chats (peut-être plus de 600 millions) ont été relâchés dans le monde entier. Ce sont des espèces non indigènes et potentiellement dangereuses pour la biodiversité. Aux États-Unis, on estime qu'il y a plusieurs dizaines de millions de chats en liberté qui causent de nombreux problèmes tels que la prédation des oiseaux et la propagation de maladies (par exemple, *Toxoplasma gondii*, *Giardia* spp). Les chats pourraient être responsables de la mort de plus de 3 milliards d'oiseaux et de 20 milliards de petits mammifères chaque année, rien qu'aux États-Unis.⁹⁷⁸

De manière générale, l'augmentation de la biodiversité végétale urbaine, la création de corridors, certaines pratiques telles que le fait de ne pas enlever les arbres morts, de ne pas tondre les pelouses, de ne pas utiliser de produits chimiques tels que les herbicides et les insecticides, profitent à de nombreuses espèces et constituent un acte d'amour envers les générations futures.

LA RESTAURATION DES ÉCOSYSTÈMES AGRICOLES VERS LA SEMI-NATURALITÉ

Dans le monde de l'agriculture moderne, il est d'usage de confondre respect de l'environnement et productivité, laissant entendre à tort que la nature n'est pas productive. À titre d'exemple d'une agriculture plus durable, une forêt plantée de châtaigniers produit plus de protéines que la surface équivalente plantée en blé, mais ne nécessite pas de travail du sol et requiert moins d'engrais et de pesticides. Les vergers d'arbres sont plus durables et il convient d'investir davantage dans leur conception (ce que l'on appelle la forêt alimentaire, la forêt comestible). La forêt est l'une des formes les plus productives que la nature ait conçues : les forêts tropicales produisent plus de 40% de matière sèche par mètre carré et par an que les forêts tempérées à feuilles caduques, et ces dernières produisent presque deux fois plus que les terres cultivées.⁷³⁸

En général, une forêt produit au moins deux fois la biomasse des cultures, sans intervention humaine. Il est important de souligner que dans les écosystèmes naturels, les plantes annuelles étaient l'exception ou l'antichambre de la désertification. Cependant, même dans une forêt, un système non durable est généré si l'on prend plus que la capacité de renouvellement ou la capacité naturelle d'augmenter la fertilité.

Nous avons détruit la nature en la remplaçant par des monocultures totalement artificielles, qui utilisent le sol pour transformer le pétrole en nourriture : au moins dix ou vingt calories d'énergie fossile pour chaque calorie alimentaire dans l'assiette. De plus, l'agriculture chimique encourage l'homogénéité génétique. La plupart des cultures, comme les vignobles et les vergers, sont des clones, c'est-à-dire des plantes génétiquement identiques cultivées sur d'immenses surfaces, partout sur la planète. Ces plantes ne sont pas reproduites par graines mais par bouturage, greffage et micropropagation.

Une augmentation de la production alimentaire est impensable sans détruire la nature : aucune civilisation ne peut durer longtemps si elle gaspille plus de dix calories pour en produire une. La planète ne peut plus se permettre des sociétés peuplées d'êtres humains dont seule une petite fraction est impliquée dans l'agriculture : 1% aux États-Unis avec un âge moyen de plus de 57 ans, ou 3,5% en Italie. Nous devons également réfléchir au fait qu'un modèle social qui ne peut être étendu au monde entier est moralement inacceptable.

Les solutions imaginables, outre la réduction de la population et de la consommation, consistent à améliorer le lien entre l'homme et la nature par l'autoproduction de nourriture. Une société basée sur le gaspillage et la consommation, et aussi nombreuse que celles des pays les plus industrialisés et les plus riches, où moins de 4% de la population est impliquée dans l'agriculture, n'est pas durable. ⁸³⁷ Il existe de nombreuses propositions et expériences pour concevoir une production agricole plus durable. Elles portent des noms différents, comme agro-écologie ou permaculture. ⁷³⁸ Les principes sur lesquels ils se fondent sont souvent équivalents, comme la volonté de ralentir la transformation de la nature en un paysage comestible ou urbanisé. Parmi les mesures nécessaires à la diffusion de ce type d'agriculture, basée sur les petits producteurs et très diversifiée, figurent l'information et la diffusion. La connexion entre les écoles et le monde de l'agriculture, entre les citoyens et la verdure urbaine, pourrait encourager des comportements individuels et collectifs très utiles. Les différentes formes d'agro-écologie fournissent quelques suggestions : ⁸³⁷

- mettre en œuvre des polycultures (différentes espèces de plantes cultivées en même temps sur la même parcelle) et des rotations annuelles de plantes (les monocultures annuelles de l'agriculture chimique peuvent, par erreur, être répétées sur la même parcelle pendant plusieurs années sans interruption) ;
- la lutte contre l'utilisation de plantes et d'animaux qui ne peuvent être reproduits par les agriculteurs ;
- encourager la reproduction des plantes et des animaux au niveau local (encourager la création de pépinières, de centres de conservation des espèces locales et de petits éleveurs d'animaux) ; encourager l'autosuffisance en matière de reproduction et de propagation des graines et des plantes est une étape fondamentale ;
- laisser une partie de la zone (10 à 30%) dans un état semi-naturel, c'est-à-dire occupée par des espèces sauvages et sans intervention humaine ;
- ne pas utiliser de pesticides ;
- réduire les besoins en combustibles fossiles : l'élimination des pesticides pourrait à elle seule réduire d'un tiers les besoins en énergie ;
- remplacer les herbicides par un fauchage mécanique et d'autres stratégies telles qu'une couverture végétale constante ;
- ne pas utiliser d'engrais chimiques ;
- encourager le recyclage des matières organiques telles que le fumier et les déchets alimentaires ;
- ne pas brûler les résidus agricoles ;
- compostage local et sans plastique ;
- assurer un travail minimum du sol ;
- ne pas utiliser de plantes génétiquement modifiées ;
- réduire la consommation de dérivés animaux ;
- investir dans les économies locales telles que la production d'énergie et d'aliments dans la région (en moyenne, les aliments parcourent plus de 2.400 km aux États-Unis) ;
- protéger les écosystèmes en impliquant les communautés locales ;
- calculer et rendre publique la consommation d'énergie par unité de kilocalorie obtenue ;
- encourager les vergers d'arbres ;
- réduire le besoin d'irrigation ;
- recueillir l'eau de pluie ;
- ne pas utiliser de plastique (par exemple pour le paillage, l'apiculture) ;
- s'opposer aux grands distributeurs, surtout s'ils ne s'engagent pas à fournir davantage d'informations : sur les ingrédients utilisés, sur l'origine des matières premières, sur la protection des travailleurs, sur la protection des producteurs (ex. : de matières premières), sur les stratégies de protection de l'environnement adoptées, sur les

kilomètres parcourus, sur l'empreinte hydrique, sur les émissions (telles que celles qui altèrent le climat), sur les pesticides utilisés, sur la quantité d'énergie utilisée par kilocalorie, sur la réduction des emballages, sur le recyclage des déchets, etc.

Notre société est tellement détachée de la nature qu'elle ne peut imaginer que l'agriculture puisse être une solution pour de nombreux défis environnementaux. Voici quelques-uns des principes de culture visant principalement l'autosuffisance énergétique et alimentaire tout en augmentant la durabilité :

- consacrer entre 50% et 60% de la surface cultivée à des plantes produisant de la biomasse comme combustible, matériau de construction, aliment pour animaux, compost, fruits et pour des services fournis gratuitement par la nature tels que la pureté de l'air et de l'eau, la préservation de la biodiversité et la protection des sols ;
- cultiver 20 à 30% des terres avec des tubercules, des céréales, des légumineuses et d'autres cultures qui fournissent de l'énergie et des protéines ;
- consacrer 10% de la surface cultivée aux légumes.

Heureusement, il existe encore sur la planète des zones de nature qui, si elles étaient laissées à elles-mêmes, pourraient se développer et restaurer les zones dégradées dans leur voisinage. Il existe des zones semi-naturelles qui ont été partiellement dégradées et qui pourraient être restaurées à leur état d'origine par des interventions simples, telles que l'élimination des espèces exotiques et la réintroduction d'espèces indigènes. Toutefois, il existe d'immenses zones de terres fortement dégradées où les écosystèmes devraient être restaurés de fond en comble (par exemple, la vallée du Pô). Dans ces cas, comme dans l'environnement agricole et urbain, l'intervention n'est pas aisée et constitue de toute façon une manipulation artificielle. Les projets de reconstruction d'espaces semi-naturels à partir de zones très dégradées nécessitent des compétences, de l'organisation, de la détermination, de la persévérance et de la participation, et ne sont donc pas faciles à mettre en œuvre. Dans certains cas, on peut tirer des leçons du passé. Les différentes techniques agricoles inventées et perfectionnées dans le bassin méditerranéen étaient basées sur le maintien d'une mosaïque de végétation composée essentiellement de forêts, de pâturages et de champs cultivés ou, dans les zones plus sèches, le pâturage arboricole était privilégié. De cette manière, un certain niveau de compromis entre la résilience de l'écosystème et la productivité utile à notre espèce est atteint.

Des zones de refuge pourraient être établies pour différents écotypes d'abeilles afin de préserver des caractéristiques génétiques uniques. La capacité de différentes sous-espèces d'abeilles à survivre sans les soins des apiculteurs pourrait être testée dans des zones isolées et réglementées. Un défi très important pour l'avenir est la capacité des abeilles à survivre sans les soins des apiculteurs. Des réserves génétiques protégées et caractérisées pourraient être établies et, parallèlement, la capacité à se nourrir et à résister aux maladies sans intervention humaine devrait être testée. Il convient de rappeler que la sélection naturelle a fait et pourrait continuer à faire des miracles, en récompensant par exemple l'émergence d'insectes résistants à des parasites insidieux.

Parmi les recommandations simples mais efficaces figurent la rotation des cultures, les cultures intercalaires, le travail minimal du sol et bien d'autres encore, déjà connues de nos ancêtres. Il faut se rappeler que par le passé, dans la culture générale, les déchets étaient considérés comme un sacrilège et que de nombreuses solutions étaient basées sur la coopération.

Parmi les pratiques agricoles prédatrices, car non conservatrices, figure le travail du sol. L'effet bénéfique du non-travail du sol sur les pollinisateurs pourrait être étudié. Il faut rappeler que probablement 70% des espèces d'abeilles construisent leurs nids dans le sol. Les fourmis peuvent être mentionnées et, en général, l'écosystème du sol bénéficie du non-travail du sol.

Dans les cultures annuelles et les vergers, le remplacement des herbicides par la fauche mécanique présente de nombreux avantages :

- le sol est protégé de l'érosion ;
- la perte de fertilité du sol est réduite ;
- le ruissellement des eaux de surface est ralenti ;
- augmente la biodiversité ;
- la communauté des organismes du sol (micro-organismes et invertébrés) n'est pas endommagée ;
- les autres animaux tels que les pollinisateurs et les oiseaux ne sont pas lésés ;
- pas de contamination de l'eau et pas d'empoisonnement de la chaîne alimentaire.

Il convient de souligner que dans certains cas, le fauchage peut encore être nécessaire après l'utilisation d'herbicides, afin de réduire la biomasse sèche qui pourrait s'enflammer et obstruer le passage. Raison de plus pour ne pas les utiliser.

Pour réduire l'utilisation de l'énergie fossile dans l'agriculture, il faudra qu'une fraction plus importante de la population travaille plus qu'aujourd'hui. Mais il y a un autre obstacle majeur. Pour atteindre une autosuffisance énergétique et alimentaire plus ou moins complète, il faut plusieurs hectares de terres fertiles par habitant. C'est une contrainte majeure, car en Italie, par exemple, nous disposons de moins de 5.000 mètres carrés par habitant, dont environ un tiers est urbanisé et seulement un tiers est cultivé. En raison de la disponibilité limitée de sols fertiles, il n'est pas possible d'envisager un système agricole totalement indépendant des combustibles fossiles.

Une preuve de la déconnexion de la nature se trouve dans nos programmes d'enseignement scolaire où le travail agricole et la production alimentaire sont totalement absents. Nous ne disposons pas des connaissances écologiques répandues et de la culture agronomique nécessaire pour assurer la reproduction indépendante de plantes adaptées à divers environnements.

AUGMENTER LES CHANCES DE SURVIE DES ENNEMIS DES CULTURES

Parmi les pratiques proposées pour la conservation de l'écosystème naturel ou semi-naturel à proximité des zones agricoles figure la stratégie de manipulation de l'habitat pour favoriser les ennemis naturels des maladies des plantes et les organismes utiles aux agriculteurs, tels que les pollinisateurs sauvages. L'augmentation du nombre d'espèces dans l'écosystème agricole est une stratégie qui va dans ce sens : elle accroît la diversité pour favoriser les organismes utiles aux agriculteurs. Cependant, il s'agit d'une vision anthropocentrique de la manière dont la biodiversité de l'écosystème agricole pourrait être améliorée, elle est donc partielle et incomplète. Elle présente l'avantage d'être une proposition plus écologiquement durable que la monoculture intensive actuelle.

La restauration de l'environnement augmente la résilience aux changements du système agricole, bien que cette vision soit limitée par les intérêts économiques humains. Par exemple, certains insectes qui se nourrissent d'autres insectes ont encore besoin, à certaines étapes de leur cycle de vie, de se nourrir de pollen ou de plantes. Par conséquent, la présence de plantes à l'année à proximité des champs cultivés favorise la présence de zones de refuge et de sources de nourriture à vie pour de nombreux insectes utiles. Dans cette optique, la conception des agro-écosystèmes doit être réalisée en augmentant le pourcentage de terres non consacrées à la culture. Les zones de refuge pour les organismes utiles fournissent des sources de nourriture alternatives et des zones de nidification pour les agriculteurs (par exemple, dans les sols qui ne sont pas labourés).

L'augmentation de la biodiversité de l'exploitation doit apporter des avantages en termes d'économie d'énergie, de ressources et de pesticides. L'écosystème agricole devrait être

manipulé de manière à recevoir une partie de l'énergie et des ressources nécessaires pour maintenir la rentabilité de la production à partir de sources naturelles, comme les pollinisateurs sauvages plutôt que les abeilles d'élevage, ou les insectes carnivores et les oiseaux insectivores plutôt que les insecticides. Cela conduit à un système de production plus diversifié et plus résilient, c'est-à-dire capable de résister plus longtemps au changement. L'augmentation de la biodiversité de l'agro-écosystème favorise la génération spontanée d'une plus grande "immunité" contre les parasites. Des équilibres plus complexes sont générés qui tendent à limiter la dominance de quelques espèces comme celles qui se nourrissent des cultures. La monoculture intensive ne fournit pas un environnement approprié pour la survie des ennemis naturels des ravageurs et implique une réduction drastique de la biodiversité et une simplification des environnements agricoles qui deviennent, pour la plupart des animaux sauvages, un désert inhospitalier. La nourriture ne devient abondante que quelques semaines par an et pour quelques espèces, qui seront principalement celles qui se nourrissent de plantes cultivées. Les écologistes savent depuis longtemps que la réduction de la biodiversité d'un écosystème favorise quelques espèces, qui envahissent souvent l'environnement parce qu'elles n'ont pas de concurrents. Par exemple, le nombre d'insectes herbivores a tendance à augmenter lorsque les écosystèmes sont simplifiés. En outre, les pesticides tels que les insecticides sont très souvent plus nocifs pour les insectes carnivores que pour les herbivores. En outre, les insectes prédateurs sont souvent moins à même de développer une résistance aux insecticides que les herbivores, qui sont dans bien des cas plus nombreux et moins mobiles.

Certains insectes utiles doivent se nourrir des ravageurs des cultures (par exemple, les hyménoptères et les coléoptères qui se nourrissent de pucerons) et ont besoin de fleurs et de zones de refuge pour accomplir leur cycle. Les insectes bénéfiques peuvent avoir besoin d'un réseau complexe de plantes avec lesquelles ils communiquent par des signaux chimiques olfactifs. Pour faciliter la croissance et le développement des ennemis naturels des plantes, il est utile de disposer de couloirs avec des fleurs et des zones de refuge dans lesquelles ils peuvent accomplir leur cycle de vie, et de disposer de sources de nourriture autres que les proies. C'est le cas d'une guêpe (*Trybliographa rapae*) qui parasite des insectes nuisibles comme la mouche du chou-fleur (*Delia radicum*).⁶⁴⁴ La *Delia radicum* est une petite mouche (Diptera) dont l'adulte se nourrit de nectar, tandis que la larve se nourrit en creusant des tunnels dans les racines et les pétioles des feuilles.⁶⁴⁵ Les tissus affectés sont sujets à la pourriture. Les femelles de la guêpe (*Trybliographa rapae*) qui parasitent la mouche (*Delia radicum*) sont attirées par les substances volatiles produites par les plantes attaquées par ce diptère et par les substances produites par les plantes à fleurs dont le nectar fait partie du régime alimentaire de la guêpe. L'attraction simultanée de plantes malades et de plantes productrices de nectar permet donc de contrer la présence de la mouche du chou.⁶⁴⁴ Le diptère permet la reproduction et le nectar nourrit. Pour être efficace, ce type de lutte biologique nécessite la présence simultanée des insectes à parasiter pour la reproduction et du nectar pour l'alimentation.

Une autre stratégie explorée depuis plusieurs décennies, mais qui n'a pas débouché sur des applications à grande échelle, comme la distribution de pesticides, est l'élevage artificiel d'insectes utiles. Le lâcher d'insectes utiles sélectionnés dans les champs a été effectué pour des dizaines d'espèces, bien que les applications ne soient pas très répandues et ne concernent souvent que des situations particulières telles que les cultures sous serre. Cependant, cette pratique peut aussi être une catastrophe d'un point de vue écologique. Il ne faut pas oublier que l'une des principales causes de la réduction de la biodiversité, ainsi que de la destruction des écosystèmes, est la propagation d'espèces exotiques.

PROMOUVOIR LES AGRO-SYSTÈMES EN MOSAÏQUE

Deux autres stratégies utiles pour réduire l'abondance des ravageurs et accroître la biodiversité sont la polyculture, c'est-à-dire la culture simultanée de différentes espèces, et le remplacement des cultures annuelles par des cultures pluriannuelles. Par exemple, la culture simultanée de différentes variétés de riz a permis de réduire l'utilisation de fongicides, entre autres avantages. En général :

- accroître la biodiversité également en cultivant des variétés locales,
- construire des corridors et des îlots semi-naturels,
- réduire l'étendue des monocultures,

sont des pratiques qui favorisent un agrosystème en mosaïque, plus résilient et durable. Les polycultures sont moins vulnérables aux dommages causés par les ravageurs et aux changements, qu'ils soient climatiques ou économiques. La production fondée sur l'uniformité (génétique) constitue désormais une menace majeure pour la biodiversité et la durabilité socio-économique. Le mythe selon lequel la productivité est incompatible avec la polyculture doit être dissipé avant qu'il ne soit trop tard. De nombreuses études montrent que la polyculture génère davantage de nutriments par unité de surface. À cet égard, nous devrions essayer de penser en termes de santé par hectare et prendre en compte des paramètres qui mesurent l'efficacité et la durabilité, tels que le rapport entre l'énergie investie et l'énergie obtenue, la modification de la fertilité du sol et la consommation d'eau par unité (par exemple, calorie ou kilogramme). Dans de nombreux cas, nous avons déjà dépassé les limites de sécurité que la biosphère nous permet d'atteindre. L'agriculture industrielle, dans de nombreux cas, accroît la faim et la pauvreté, et réduit la productivité en termes d'efficacité écologique. Il convient de remarquer que sur moins de 30% des terres arables, les petits agriculteurs produisent 70% de la nourriture consommée dans le monde. Alors que les grandes entreprises utilisent 70% des terres pour produire 30% de la nourriture. Ces données montrent que les petites exploitations sont plus efficaces et assurent une plus grande agro-diversité. Les petites exploitations agricoles, surtout en temps de crise, peuvent constituer une solution précieuse pour lutter contre la faim et la pauvreté. Malheureusement, dans les pays industrialisés comme ceux d'Europe, la tendance est inverse : entre 2007 et 2010, les propriétaires d'exploitations de moins de 10 hectares ont perdu 17% de leurs terres arables (une superficie plus grande que la Suisse), tandis que les exploitations de plus de 50 hectares ont acquis plusieurs millions d'hectares.¹⁷⁵ Le renforcement de l'agriculture familiale, qui organise et protège largement les zones cultivées, assurant aux petites communautés l'autonomie nécessaire à leur survie, est une solution qui devrait également être encouragée dans les pays industrialisés. Il est nécessaire de réévaluer, de requalifier et de soutenir le développement d'une production primaire à petite échelle, visant à soutenir les communautés locales.

La production mondiale de céréales a plus que doublé en 25 ans (de 0,6 à 1,3 milliard de tonnes en 2014), alors que l'utilisation des terres arables a beaucoup moins augmenté (environ 12%).⁸⁴³ Ce chiffre ne tient pas compte de l'augmentation de l'inefficacité énergétique (rapport entre l'énergie investie et l'énergie obtenue), il ne considère pas une valeur négative à la dévastation de l'environnement (introduction d'espèces exotiques, utilisation de pesticides, exploitation des sols, déforestation, incendies, etc.) et il ne tient pas compte du fait que les pertes dues aux parasites et au gaspillage sont susceptibles de diminuer la disponibilité alimentaire de 30 à 50%.

L'une des faiblesses est que nous manquons souvent des connaissances nécessaires pour rétablir des équilibres pseudo-naturels dans le but, par exemple, de réduire l'utilisation de pesticides. Les interactions écologiques entre des dizaines ou des centaines d'espèces, qui vivent dans le sol grâce aux plantes, sont largement méconnues. Dans la plupart des cas, les cultures sont complètement artificielles et étrangères à l'écosystème d'origine, qui a souvent été définitivement détruit et éteint. Dans les rares cas où les cultures se trouvent dans leur habitat

d'origine, c'est-à-dire un habitat qui n'a pas encore été complètement détruit par l'homme, il est possible de les laisser à la nature. Il suffit de laisser des zones proches de la nature en friche pour enregistrer des améliorations, qui sont guidées par des règles écologiques prouvées par l'évolution naturelle.

LA POLYCULTURE EST ÉCOLOGIQUEMENT BÉNÉFIQUE

La culture simultanée d'espèces importantes pour l'agriculture sur une même zone peut être une stratégie utile pour réduire la pression négative de certains ravageurs. En effet, les ravageurs des plantes ont tendance à être moins abondants, de plus de 48%, dans les polycultures annuelles par rapport aux monocultures annuelles ; les ravageurs des plantes peuvent être réduits de plus de 60% dans le cas des polycultures polyannuelles par rapport aux monocultures traditionnelles. Quelques exemples sont donnés ci-dessous : ⁶⁹⁴

- l'avoine cultivée avec des haricots pour lutter contre les pucerons ;
- maïs cultivé avec du trèfle, du soja ou de la citrouille pour lutter contre divers ravageurs tels que la pyrale, les pucerons ou les acariens ;
- les melons cultivés avec du blé pour lutter contre les pucerons ;
- des pêchers cultivés avec des fraises pour contrer une mite.

La culture simultanée de plusieurs espèces réduit le danger de certaines maladies jusqu'à 74% par rapport à la monoculture ; la polyculture peut réduire la présence d'agents pathogènes jusqu'à 64%. ⁶¹⁰ La monoculture intensive favorise la disparition des insectes et des oiseaux, altérant l'équilibre qui est également nécessaire à l'agriculture.

La culture simultanée de différentes plantes est une amélioration d'un point de vue écologique, surtout si le paysage agricole devient une mosaïque de petites parcelles, avec des espèces différentes alternant au fil du temps. L'association de différentes plantes peut être expérimentée, l'une d'entre elles pouvant être la culture principale et les autres pouvant servir à diverses fins, comme fournir de la nourriture lorsqu'une espèce est gravement compromise.

Il est important de souligner qu'une augmentation de la biodiversité de l'écosystème agricole ne signifie pas nécessairement une diminution significative de la présence d'ennemis des ravageurs des cultures. Une plus grande diversité garantit une meilleure capacité de résistance aux changements et aux événements négatifs.

Nous devons penser de manière moins anthropocentrique et non pas en fonction d'objectifs essentiellement économiques, à atteindre exclusivement à court terme. Les zones non cultivées sont beaucoup moins perturbées par des pratiques qui rendent la vie impossible aux organismes utiles. Dans les zones non cultivées, la fréquence du labourage, de la fertilisation, de la pulvérisation de pesticides et de l'irrigation est nulle ou du moins inférieure à celle des zones cultivées. Une plus grande diversité contrecarre le synchronisme des cycles végétaux typique des zones cultivées en améliorant la présence des nutriments nécessaires aux organismes sauvages pendant de plus longues périodes. Il existe suffisamment de preuves pour suggérer que l'augmentation de la biodiversité dans le système agricole améliore la résilience, c'est-à-dire la capacité à résister au changement. Cela est suffisant pour justifier un investissement dans cette direction.

LA ROTATION ANNUELLE DES CULTURES NE COMPROMET PAS LES OBJECTIFS ÉCONOMIQUES

L'augmentation de la biodiversité de l'écosystème agricole, la diminution de l'utilisation de produits chimiques (pesticides et engrais) et la réduction de l'utilisation de combustibles fossiles sont des objectifs clés. De nombreuses études montrent que l'augmentation de la biodiversité et l'adoption de techniques agronomiques plus durables ne réduisent pas ou augmentent la productivité et, surtout, que les coûts sont considérablement réduits. Dans les cas où un risque élevé de perte de récolte ne peut être toléré et où il n'y a pas beaucoup de ressources économiques disponibles pour la culture, la diversification de l'agro-écosystème est l'une des meilleures assurances contre ces risques : surtout pour les agriculteurs qui le font principalement pour leur propre alimentation, c'est-à-dire la majorité.

L'alternance de différentes cultures au fil des ans présente un autre avantage majeur : elle réduit le danger de certaines maladies végétales, comme celles causées par certains champignons dans le riz en Chine ou l'orge en Allemagne.⁶¹⁰

Un exemple d'étude menée en Amérique du Nord (Iowa) entre 2003 et 2011 est donné : le système de rotation des cultures de maïs et de soja sur deux ans, avec utilisation intensive de pesticides et d'engrais chimiques (par exemple à base d'azote), est comparé à des méthodes plus durables.⁶⁰⁹ Les rotations de trois ans (maïs - soja - blé (triticale ou avoine) et trèfle) ou de quatre ans (maïs - soja - blé (triticale ou avoine) - luzerne), accompagnées d'un remplacement au moins partiel des engrais azotés chimiques par du fumier de bovins et d'une utilisation réduite d'herbicides, ont donné des résultats économiques similaires ou meilleurs.⁶⁰⁹ L'utilisation de plantes fixatrices d'azote (luzerne et trèfle en l'occurrence) et l'enrichissement du sol par l'utilisation de fumier animal sont des stratégies utilisées depuis longtemps. La pratique de la rotation des cultures génère un autre avantage majeur par rapport à la monoculture répétée : une réduction du nombre et de la biomasse des mauvaises herbes pouvant atteindre 50 à 80%.⁶¹⁰ En augmentant la complexité de la rotation et en réduisant l'utilisation de produits chimiques (herbicides et engrais chimiques), on obtient une rentabilité équivalente ou supérieure, avec un impact environnemental moindre. Sans réduire les bénéfices économiques, les impacts négatifs, tels que la contamination de l'eau, la distribution de pesticides et d'engrais chimiques azotés, sont réduits (il faut rappeler que le processus chimique d'obtention d'engrais azotés à partir d'engrais atmosphériques nécessite des températures et des pressions très élevées et, pour cette raison également, requiert beaucoup d'énergie).

Dans des conditions environnementales extrêmes, telles qu'une sécheresse soudaine, il a été démontré que les cultures céréalières alternées avec des légumineuses et fertilisées avec du fumier sont plus productives et plus résilientes que les systèmes traditionnels : on enregistre une production supérieure de 137% pour le maïs et de 196% pour le soja lorsqu'ils sont fertilisés avec du fumier et cultivés en rotation avec des légumineuses, par rapport à une monoculture répétée, soutenue par des produits chimiques.⁶¹⁰ L'alternance de céréales (comme le maïs) et de légumineuses (comme les fèves) peut augmenter la production céréalière de 43%.⁶¹⁰

La rotation de différentes cultures pluriannuelles et annuelles est un système simple qui peut être utilisé pour réduire la gravité de certaines maladies des plantes. La rotation des cultures, par exemple des céréales avec des légumineuses, améliore la fertilité du sol et empêche la propagation des mauvaises herbes. Pour donner un exemple concret, voici une estimation significative : aux États-Unis, le remplacement de la pratique de la rotation des cultures de maïs avec d'autres plantes, par la monoculture de maïs perpétuée au fil des ans, génère une augmentation des pertes de rendement (dues aux insectes) comprise entre 3,5% et 12% ; ce résultat négatif est enregistré malgré le fait que, dans le cas du maïs, l'utilisation d'insecticides (organo-phosphorés) a été multipliée par plus de 1.000 (le maïs aux États-Unis fait partie des

cultures qui utilisent le plus d'insecticides).⁵⁰² La combinaison, la rotation et la diversification sont des principes de l'agriculture durable qui peuvent augmenter considérablement les bénéfiques, également en termes économiques.⁵³⁰

Il faut en conclure que la diversification de la rotation des cultures et la réduction de l'utilisation des produits chimiques sont des stratégies à encourager car elles peuvent être poursuivies sans compromettre les objectifs économiques.

L'EXTENSION DES CORRIDORS NATURELS

La fragmentation des habitats produit une mosaïque dans laquelle les distances entre le nid et les sources de nourriture augmentent, ainsi que les barrières, qui deviennent insurmontables pour certains animaux : par exemple, les abeilles qui nichent sous terre et les abeilles solitaires, plus petites, sont plus sensibles à la fragmentation des écosystèmes (on connaît au moins 14.000 espèces d'abeilles solitaires).⁸⁵³ Il faut savoir que les déplacements de certains insectes pollinisateurs dépassent rarement quelques centaines de mètres (100 m pour les abeilles solitaires comme *Osmia cornuta*) et que leurs sites de nidification préférés sont souterrains et dans les arbres. Certains insectes ne se déplacent pas sur des surfaces sans abri, végétation ou nourriture. Ainsi, les mouvements du sol tels que les labours, l'absence d'arbres, les barrières physiques (par exemple l'urbanisation) et la distance de quelques centaines de mètres entre le nid et les fleurs sont des facteurs qui rendent le cycle de vie impossible pour de nombreuses espèces d'insectes pollinisateurs.

La création de corridors naturels permet le déplacement d'espèces sauvages entre des territoires éloignés et assure une plus grande biodiversité, ce qui est à l'opposé de ce qui se passe dans la plupart des monocultures intensives actuelles. Il convient donc de concevoir un nouveau type d'écosystème agricole, dont les caractéristiques le rendent plus durable et plus résilient.

Il n'est pas facile de déterminer quelles espèces planter dans les zones non cultivées, car on peut enregistrer des effets contraires à ceux recherchés : les zones de refuge proches des champs cultivés peuvent favoriser les insectes nuisibles ou d'autres parasites des cultures plutôt que les organismes bénéfiques. C'est précisément parce qu'il existe des difficultés objectives que les prédateurs généralistes, tels que les fourmis qui s'attaquent aux chenilles des papillons et aux papillons des agrumes, ont été ciblés pour tenter d'obtenir des résultats. Une stratégie adoptée par les agriculteurs chinois depuis plus de 2000 ans, et toujours utilisée aujourd'hui, consiste à fournir des abris en paille aux prédateurs d'insectes tels que les araignées.⁶⁹⁴

En général, la présence de plantes fournissant du pollen, du nectar, des graines et des fruits favorise de nombreux ravageurs et parasitoïdes des ennemis des cultures. De nombreux insectes, comme certaines guêpes qui mangent d'autres arthropodes, se nourrissent également de pollen. Certains insectes utiles comme les syrphes, les guêpes et les coccinelles se nourrissent de miellat, c'est-à-dire des substances sucrées produites par les insectes homoptères comme les pucerons.

La présence de corridors naturels a démontré plusieurs avantages :⁶⁹⁴

- Autour des vergers de pommiers et entre les rangs, la présence de bandes avec des espèces herbacées a favorisé la présence d'insectes se nourrissant de pucerons. Les pommiers présentent moins de dégâts de pucerons que les vergers sans graminées. La présence de plantes (comme *Phacelia tanacetifolia*) entre les rangées de pommiers favorise les insectes utiles comme les pollinisateurs.

- La pyrale du maïs (*Ostrinia nubilalis*) est un papillon qui endommage le maïs et qui est parasité par une guêpe (*Eriborus terebrans*). Les champs de maïs entourés de

végétation semi-naturelle subissent moins de dégâts en raison de la présence de la guêpe parasitoïde. Il existe un effet de gradient, c'est-à-dire que l'effet protecteur de la zone semi-naturelle, qui offre un abri à la guêpe, diminue avec la distance. Cette guêpe est largement utilisée dans les plans de lutte biologique depuis 1927 en Amérique du Nord, où elle est devenue une espèce exotique. En augmentant la distance entre les champs cultivés et les zones semi-naturelles servant de refuge aux ennemis des cultures, le temps entre l'apparition des ravageurs et l'arrivée de leurs prédateurs augmente. En augmentant l'accès de la guêpe (*Eriborus terebrans*) au nectar et au miellat des pucerons, on augmente sa capacité de survie dans les champs cultivés.

- L'augmentation de la fraction de zones vertes non cultivées autour des champs cultivés en céréales multiplie par quatre la présence d'araignées. Les araignées sont de redoutables prédateurs.

- En Grande-Bretagne, des bandes de fleurs sauvages, larges de six mètres et espacées de 100 mètres, ont donné de bons résultats : les pollinisateurs sauvages et les ennemis naturels des ravageurs des cultures ont augmenté.¹⁹⁶ L'agriculture industrielle a également bénéficié de cette augmentation de la biodiversité.

- Au Royaume-Uni, la diversification des cultures par la plantation de fleurs sauvages a permis d'augmenter le nombre de pollinisateurs tels que les bourdons.⁶¹¹ La pratique consistant à planter des espèces sauvages, plutôt que de laisser des bandes de terre non cultivées, est plus rapide pour encourager la colonisation par les pollinisateurs.

- La présence d'arbres favorise certaines fourmis qui s'attaquent aux insectes nuisibles à la culture du café ou du cacao. Ces fourmis sont favorisées par les zones d'ombre créées par la plantation d'arbres comme le cocotier (dans la culture du cacao au Ghana).

- Il est utile de planter autour des zones cultivées des espèces d'arbres qui sont attractives pour les ravageurs d'intérêt agricole, comme cela a été fait au Brésil où la densité d'un coléoptère parasite des agrumes (*Cratosomus flavofasciatus*) a été réduite par la plantation d'un petit arbre (*Cordia verbenacea*) à une distance de 100-150 mètres.

- L'idée de planter des plantes qui répugnent les ravageurs des cultures et des plantes qui attirent leurs ennemis est intéressante. Ces plantes ont une double action : repousser les ravageurs et attirer les ennemis naturels des ravageurs de la culture. Cette stratégie a été appliquée à la culture du maïs en Afrique.

- La culture de la mangue (*Mangifera indica*) bénéficie d'une pollinisation entomophile par de nombreux insectes différents, tels que les mouches et les abeilles, de sorte que la création de zones semi-naturelles avec des fleurs sauvages à proximité des champs cultivés génère une amélioration : il y a une plus grande présence de pollinisateurs et une moindre incidence des maladies.⁶¹⁴ Les fleurs de manguiers situées à proximité de zones semi-naturelles peuvent être visitées par au moins 56 espèces différentes, dont huit espèces de fourmis. Au moins cinq espèces de mouches et d'abeilles visitent les fleurs de manguiers et celles des zones environnantes. Les abeilles domestiques sont également utilisées pour la culture des mangues (au moins une ruche par hectare), bien qu'elles ne soient probablement pas le pollinisateur le plus approprié. Une distance de 300 m entre la culture de mangues et la zone occupée par des espèces

sauvages suffit à réduire la production de mangues jusqu'à 41%. Dans les champs cultivés loin des zones semi-naturelles, la biodiversité des pollinisateurs est réduite de 74%.⁶¹⁴ Ces données confirment que l'absence de pesticides et la présence simultanée à proximité (à moins de 300 m) de zones semi-naturelles ou même de meilleurs habitats sauvages augmentent le nombre d'espèces visitant les fleurs de manguiers et la productivité de cette culture. La restauration des zones semi-naturelles augmente la productivité du manguiers d'environ 1 à 5 kg de fruits par arbre. Un aspect intéressant pour les agriculteurs est que l'établissement de zones semi-naturelles, dans au moins tous les 4 hectares de manguiers, est économiquement viable même si cela réduit le nombre d'arbres productifs. L'analyse économique montre que les avantages de l'augmentation de la productivité résultant de la restauration des zones semi-naturelles sont 6 à 7 fois supérieurs aux coûts. En conclusion, la restauration des zones sauvages autour des cultures qui ont besoin de pollinisateurs est pratique pour l'agriculteur et bénéfique pour l'environnement. Ces résultats positifs ont été obtenus dans des cultures de manguiers situées à une distance de 50 à 150 m de zones semi-naturelles de 25 mètres carrés, où 30 espèces sauvages ont été semées. Une petite zone restaurée par la plantation de plantes sauvages peut produire des bénéfices pour une surface allant jusqu'à 3 ou 4 hectares de mangues, améliorant ainsi la biodiversité et la résilience de l'ensemble de l'agro-écosystème. Les coûts liés à la création de ces petites mesures compensatoires pour les pollinisateurs sont compensés par les avantages. Les résultats mettent également en évidence un autre aspect : l'importance de ne pas utiliser d'herbicides et de ne pas entraver la croissance des fleurs sauvages, car cela profite également à la culture.

- Les cultures servies par les apiculteurs, comme les cerises (*Prunus*), bénéficient de la présence de zones semi-naturelles qui constituent des zones de refuge pour les insectes pollinisateurs sauvages. Augmenter de 20 à 50% la proportion de la surface occupée par des espèces sauvages ou des milieux semi-naturels (dans un rayon de moins de 1 km) permet d'augmenter la production de cerises de 150%, quelle que soit la densité d'abeilles domestiques.⁶¹⁶ Le service rendu par les pollinisateurs sauvages, lorsqu'il existe grâce à la présence de zones non cultivées, dépasse celui des abeilles domestiques d'élevage. Cette analyse confirme que la présence de zones sauvages autour des champs cultivés (dans ce cas, moins d'un kilomètre) génère également des bénéfices importants pour les agriculteurs et que le service de pollinisation fourni gratuitement par la nature dépasse celui obtenu avec l'aide des apiculteurs. Des résultats similaires ont été obtenus pour la culture des pastèques : si elles sont situées loin des zones occupées par des plantes sauvages, la biodiversité des pollinisateurs est réduite et la culture est également endommagée.⁶¹⁹

- L'augmentation de la biodiversité végétale à proximité des cultures de colza (*Brassica napus*), dans un rayon de 0,5 km, a entraîné une augmentation du poids des graines de 18% et une augmentation de la valeur marchande de 20% : l'huile des graines issues de la pollinisation entomophile contient moins de chlorophylle et plus d'huile par graine, et les graines sont plus grosses.⁶¹⁷ Il convient de rappeler que les plantes de colza sont capables de s'autoféconder, mais qu'elles bénéficient de la présence d'insectes qui se nourrissent de pollen et de nectar, comme les abeilles domestiques et d'autres insectes (par exemple, les syrphes¹ et les bourdons). Ces résultats confirment que la présence

¹ Les syrphes (Syrphidae) sont une grande famille cosmopolite d'insectes de l'ordre des diptères, comprenant plus de 6.000 espèces. Ils se caractérisent par une hétérogénéité marquée, tant dans la morphologie que dans l'éthologie de leurs stades juvéniles. L'importance de cette famille est due à deux aspects distincts : les adultes font partie des

d'insectes pollinisateurs sauvages améliore la qualité de la production et, dans ce cas, la valeur marchande du colza dont on extrait l'huile, même avec l'intervention simultanée d'abeilles domestiques. Le service offert gratuitement par la nature donne les meilleurs résultats lorsque la zone semi-naturelle ou sauvage se trouve à moins de 500 mètres des plants de colza, et non à 1 km.⁶¹⁷ À mesure que la proportion de la surface occupée par les plantes de colza augmente, par rapport aux zones semi-naturelles, la biodiversité entomologique diminue.

Des résultats équivalents sont obtenus avec une plante du même genre mais qui nécessite une pollinisation croisée et, par conséquent, exige la présence de pollinisateurs. *Brassica rapae* n'est pas auto-compatible et est donc plus sensible au manque de pollinisateurs. Chez les plantes qui peuvent être pollinisées par le vent, ces améliorations sont probablement dues à plusieurs facteurs tels que la plus grande quantité de pollen transportée par les insectes et la plus grande probabilité de croisement entre des plantes génétiquement éloignées. Il convient de rappeler que les plantes du genre *Brassica* (comme celles qui viennent d'être présentées, à savoir *Brassica napus* et *Brassica rapae*) ont également été génétiquement modifiées, par exemple pour résister à l'herbicide glyphosate.⁶¹⁹ La mesure de l'abondance des insectes pollinisateurs sauvages dans trois types de cultures de *Brassica napus* et *Brassica rapae* (au Canada) : celles cultivées selon la méthode traditionnelle, celles cultivées selon les principes de l'agriculture biologique et celles génétiquement modifiées pour la résistance aux herbicides montre que le service de pollinisation est très faible dans les cultures génétiquement modifiées, qu'il est faible dans les cultures traditionnelles, tandis que les meilleurs résultats sont enregistrés dans les champs gérés selon la méthode de l'agriculture biologique.⁶¹⁹ Le nombre d'abeilles par ordre décroissant était : agriculture biologique > agriculture conventionnelle > culture de plantes génétiquement modifiées. Ces résultats peuvent s'expliquer par le fait que l'agriculture biologique n'utilise pas de pesticides, tels que les insecticides qui tuent les insectes utiles et les herbicides qui détruisent les plantes nécessaires à leur survie. Dans la culture des plantes génétiquement modifiées, on utilise de plus grandes quantités d'herbicides comme le glyphosate, qui détruisent les sources nécessaires à la survie des insectes utiles : des insecticides ont également été utilisés pendant la floraison (sauf dans les champs cultivés biologiquement). Les abeilles domestiques représentaient moins de 2% des insectes capturés. La pollinisation par des espèces sauvages était donc très importante. Un résultat intéressant de cette recherche concernant la biodiversité entomologique est que pendant la floraison, 342 espèces d'insectes sont capturées dans l'agriculture biologique, 230 espèces dans les champs cultivés de manière conventionnelle et 101 espèces dans les champs occupés par des plantes génétiquement modifiées ; la biodiversité entomologique était corrélée à la biodiversité végétale. En conclusion, les pollinisateurs sauvages sont en mesure de remplir la fonction requise par les agriculteurs dans le cas de l'agriculture biologique, mais ce service naturel est insuffisant dans les champs gérés selon les méthodes de l'agriculture conventionnelle et est pire dans ceux occupés par des plantes résistantes à l'herbicide glyphosate, qui ont la plus faible abondance d'espèces végétales sauvages.

Dans la culture du colza, la présence de zones non cultivées sur 30% de la surface a entraîné une augmentation de la production et une réduction des coûts qui ont justifié cette stratégie en termes agronomiques.⁵⁸⁶ La production agricole de colza s'améliore en présence de zones non cultivées à une distance maximale de 750 mètres et pour une extension de 30% de la surface cultivée.⁵⁸⁶ La présence de zones non cultivées occupées par des plantes sauvages augmente le

insectes pollinisateurs les plus communs et les plus répandus, juste après les Hyménoptères Apoidea; de plus, les larves de nombreuses espèces sont des prédateurs très actifs d'insectes phytophages, notamment de pucerons. Ils peuvent effectuer de longues migrations et traverser des étendues de mer.

nombre d'insectes pollinisateurs sauvages, qui rendent un service indispensable aux cultures. Ces zones de refuge pourraient accroître l'indépendance des agriculteurs vis-à-vis de la pollinisation d'espèces cultivées comme *Apis mellifera*.⁶²²

- De nombreux arthropodes sont peu mobiles ; en fait, le fait de semer de la luzerne à proximité de la culture du coton assure une augmentation significative des prédateurs jusqu'à quelques mètres de distance. Il suffit de s'éloigner de 10 à 50 m de la zone refuge pour réduire de moitié le nombre de certains prédateurs. Selon certaines indications concernant la culture du coton, les bandes de luzerne devraient être espacées de moins de 300 m et avoir une largeur de 8-12 m.⁶⁹⁴ Outre la luzerne, des bandes d'autres cultures telles que le pois chiche et le cajan (*Cajanus cajan*, une légumineuse qui est un type de haricot) ont été essayées avec succès dans la culture du coton.

Il n'est pas facile de déterminer quelle est la fraction minimale de la surface qui doit rester non cultivée pour favoriser les ennemis des cultures. Dans le cas des céréales et du colza, certaines recherches suggèrent que si le pourcentage de surface non cultivée est inférieur à 20% de la surface, il existe une différence significative dans la densité des ennemis des cultures entre le périmètre (près de la zone de refuge) et le centre de la surface. Si le pourcentage de la surface consacrée à la zone refuge dépasse 20%, la différence de densité dans le champ cultivé est beaucoup plus faible et, en général, le parasitisme par les ennemis naturels des phytopathogènes est beaucoup plus efficace. En conclusion, pour les céréales et le colza, un pourcentage supérieur à 20% peut être la valeur à suggérer. Il faut savoir que de nombreux insectes ne sont capables de se déplacer que de quelques centaines de mètres au cours de leur vie. Par conséquent, une stratégie susceptible de favoriser la présence et le déplacement d'arthropodes utiles peut consister à former des bandes de zones semi-naturelles au milieu des zones cultivées. La création de couloirs favorise les déplacements. Pour de nombreuses espèces sauvages sensibles à la fragmentation de l'habitat, la proportion de zones non cultivées ou naturelles devrait être supérieure à 30%.

Il n'y a donc pas de réponse concluante concernant la fraction minimale de terres agricoles qui devrait être allouée pour former des zones semi-naturelles. Certaines études suggèrent qu'au moins 10% de la surface devrait être laissée en friche. À cet égard, il convient de rappeler que les exploitations agricoles consacrent généralement moins de 3% de leur superficie aux terres non cultivées. Cette superficie est très souvent le minimum nécessaire pour garantir la présence de routes d'accès, de lignes électriques, de zones de protection des cours d'eau et de zones urbanisées.

Certaines stratégies européennes de soutien à l'agriculture ont suggéré par le passé de diversifier la production agricole à des fins écologiques sur 5% des parcelles.⁷⁷³ Cette fraction est trop faible pour obtenir les résultats souhaités. Plusieurs études, par exemple sur les abeilles solitaires qui sont des pollinisateurs utiles, établissent qu'il serait très efficace, pour les protéger, de consacrer au moins 20% de la surface cultivée à des zones semi-naturelles avec des fleurs sauvages.⁸⁵³ Il n'est pas possible d'établir un seuil universel, mais comme on peut s'y attendre, plus la surface qui fournit un abri pour les nids et de la nourriture est grande, plus les avantages pour la biodiversité sont importants. De nombreux indicateurs montrent une amélioration de la santé des abeilles mellifères si la disponibilité et la variété du pollen et du nectar augmentent. Parmi les indicateurs positivement corrélés, outre l'état de la colonie (nombre d'individus morts et vivants, nombre de larves, quantité de miel, etc.), figurent la quantité de graisse dans le corps et la quantité de certaines protéines comme la vitellogénine.⁸⁵⁸

La Commission européenne avait fixé l'objectif suivant pour 2020 :¹¹⁸²

"Pour donner à la faune, à la flore, aux pollinisateurs et aux régulateurs naturels de parasites l'espace dont ils ont besoin, il est urgent d'affecter au moins 10% des terres agricoles à des éléments du paysage présentant une grande diversité, tels que des bandes tampons, des jachères complètes ou rotatives, des haies, des arbres non productifs, des terrasses et des étangs, qui contribuent tous à renforcer le piégeage du carbone, à prévenir l'érosion et l'épuisement des sols, à filtrer l'air et l'eau et à favoriser l'adaptation au climat."

Consacrer entre 10% et 30% des terres agricoles (périmètres, bords de canaux et de rivières) à des zones sauvages est un objectif réaliste et en même temps efficace. Il est également important de construire des corridors écologiques qui favorisent la dispersion. La présence de corridors écologiques favorise la biodiversité et l'adaptation à des changements tels que le changement climatique.^{621, 1182} La fragmentation des habitats ne permet pas aux espèces de se déplacer (par exemple, les amphibiens et les reptiles) et, de toute façon, la vitesse du changement est dans certains cas trop rapide pour que de nombreuses espèces puissent survivre (la Commission européenne propose : *pour disposer d'un réseau naturel transeuropéen réellement cohérent et résilient, il sera également important de créer des corridors écologiques qui empêchent l'isolement génétique, permettent aux espèces de migrer et préservent et renforcent l'intégrité des écosystèmes.*)¹¹⁸²

Une fois la surface minimale de renaturalisation établie, il faut prévoir les espèces à privilégier : quelles plantes et combien de plantes à semer ? 20, 40 ou 100 types de graines différentes ? On peut choisir des annuelles, des bisannuelles et des polyannuelles, mais dans quelle proportion ? Certaines institutions ont tenté de fournir des orientations, comme en Suisse (*Station fédérale de recherche en agroécologie et en agriculture*).⁶⁹⁴ Le fait de semer des fleurs sauvages en bordure des champs a permis de multiplier par six au moins le nombre d'espèces d'arthropodes et d'atteindre une densité de 1.300 arthropodes par mètre carré dans les zones semi-naturelles.

Les petites populations souffrent de consanguinité. Les zones semi-naturelles doivent donc assurer la survie d'un grand nombre d'individus afin de faciliter les échanges génétiques entre des communautés géographiquement et génétiquement éloignées. Les zones protégées de quelques hectares ne peuvent pas protéger les insectes rares, car elles abritent des populations trop petites et isolées.

La diffusion de corridors de végétation naturelle pour réduire la fragmentation des habitats, abaisser les barrières physiques et encourager l'augmentation de la biodiversité est également une condition utile pour les agriculteurs. Planter des plantes de manière à obtenir des zones semi-naturelles permet d'obtenir bien plus dans des contextes agricoles exploités. Le simple fait de laisser des zones non cultivées contribue à accroître la biodiversité, mais dans certains cas, de meilleurs résultats peuvent être obtenus en semant des plantes appropriées, comme cela a été le cas en Angleterre, dans le but de protéger et d'encourager la propagation d'espèces de bourdons de plus en plus rares.⁶⁶⁰ Afin d'augmenter la survie des insectes qui sont favorisés par la présence de fleurs à corolle plus longue, parce qu'ils ont une langue adaptée (par exemple certains bourdons), on peut semer des plantes adaptées (par exemple des légumineuses comme les Fabaceae). Dans toute l'Europe, on constate un déclin de la présence de certaines espèces de bourdons et des espèces végétales dont ils se nourrissent (par exemple, *Trifolium pratense* et *Lotus corniculatus*).⁶⁶⁰ Le semis de plantes particulières dans de petites zones proches des champs cultivés peut contrer la réduction de la biodiversité générée par l'agriculture moderne. Il a été démontré que le semis de plantes appropriées (par exemple *Trifolium pratense*, *Trifolium hybridum*, *Lotus corniculatus*, *Onobrychis viciifolia*, *Festuca rubra*, *Poa pratensis*, *Centaurea cyanus* et *Cynosurus cristatus*) augmente la présence d'espèces d'insectes rares. Les plantes sélectionnées ont été semées à une densité de 20 kg de graines par hectare et aucun engrais ou

pesticide n'a été utilisé. La présence de ces petites parcelles dans des conditions semi-naturelles augmente le nombre d'espèces de bourdons par rapport aux zones témoins (zones non cultivées). Au total, 10 espèces de bourdons ont été observées, par ordre décroissant : *Bombus lapidarius*, *Bombus pascorum*, *Bombus hortorum* et *Bombus terrestris*.⁶⁶⁰ Huit des dix espèces ont également été enregistrées sur des sites où ces zones semi-naturelles n'étaient pas présentes, mais à des densités plus faibles : *Bombus muscorum* et *Bombus humilis*, qui sont considérées comme des espèces rares, étaient absentes. La biodiversité végétale est également accrue par les zones semi-naturelles, puisque 221 espèces de plantes à fleurs sont classées, dont au moins 50 ont été visitées par les bourdons : les plantes *Trifolium pratense*, *Trifolium hybridum* et *Lotus corniculatus* se sont avérées être les plus visitées par ces insectes. Les résultats confirment que de petites interventions sont suffisantes pour enregistrer des bénéfices significatifs. Dans ce cas, une amélioration significative de la biodiversité des pollinisateurs et des plantes a été obtenue dans le rayon d'action du bourdon (moins de 1 km) à partir de parcelles ensemencées de fleurs de 2.500 mètres carrés.

Des mesures incitatives pourraient être utilisées pour améliorer le paysage agricole et accroître la biodiversité (par exemple, des plantes, des insectes et des oiseaux). La plantation de nouvelles espèces pourrait être encouragée en distribuant gratuitement des arbres, des plantes et des graines, en impliquant les citoyens et les écoles.

Au rythme actuel de la croissance démographique, qui s'accompagne d'une augmentation encore plus rapide de l'exploitation des ressources limitées de la planète, aucune des propositions destinées à sauver les insectes, la biodiversité et l'humanité ne nous sauvera probablement. Décider de consacrer 10 ou 30% des terres agricoles à des zones naturelles ou semi-naturelles est probablement un choix politique plutôt que scientifique, car cela pourrait ne pas être suffisant. Il pourrait être nécessaire, pour sauvegarder la biodiversité et la capacité de la planète à faire vivre des milliards d'êtres humains, de consacrer au moins 50% de la surface de la terre à des réserves naturelles.⁶⁹³ Actuellement, moins de 15% de la surface de la terre et 4% des océans sont occupés par des zones qui sont, au moins formellement, protégées : il s'agit de zones protégées par des règles spécifiques pour la sauvegarde de la biodiversité (*Base de données mondiale sur les zones protégées*).⁷⁹⁵ Malgré la reconnaissance de leur importance vitale pour la conservation de la biodiversité, seule une petite fraction des zones considérées comme essentielles est sérieusement protégée et sauvegardée.

imiter les successions écologiques naturelles

La succession écologique est l'évolution d'un écosystème due à l'alternance de différentes communautés dans une même zone en fonction des changements de l'environnement physique. Le processus de succession tend à atteindre un écosystème stable, ou *climax*, où la capacité du système à absorber les perturbations externes, naturelles ou d'origine humaine, sera à son maximum. Au cours de la succession, certaines tendances générales peuvent être observées, comme une augmentation du nombre d'espèces, une augmentation de la biomasse totale, une augmentation de la fertilité et de la profondeur du sol, et une augmentation des interactions entre les différents organismes. Dans le meilleur des cas, au *climax*, la biomasse totale atteint sa valeur maximale et les espèces sont en équilibre avec leurs concurrents. Il peut falloir beaucoup de temps à une forêt pour atteindre ce stade de stabilité. Il faut plus de 2000 ans pour qu'une graine produise un séquoia géant de la taille de l'arbre nommé *Général Shermann*, qui se trouve en Amérique du Nord. Malheureusement, certains des systèmes agricoles les plus répandus sur la planète sont des monocultures de céréales, qui, dans la nature, sont facilement destinées à devenir des déserts.

Lorsqu'il existe des communautés stables parce qu'elles sont maintenues par l'action humaine, il est difficile de parler de *climax*, mais l'expression *climax anthropique* pourrait être proposée.

Une idée qu'il pourrait être intéressant de développer dans le système agricole est de planifier une série de successions écologiques, afin d'essayer d'atteindre les mêmes résultats : l'augmentation de la biodiversité et la résilience de l'écosystème aux facteurs perturbateurs. On pourrait passer de la monoculture annuelle à la polyculture annuelle, qui pourrait inclure des plantes qui fixent l'azote dans le sol. On pourrait ensuite ajouter des plantes pluriannuelles à cycle court, puis des plantes à longue durée de vie comme les vergers. Au départ, les zones pourraient alterner entre des zones cultivées avec des arbres et des zones avec des plantes herbacées et des arbustes pluriannuels. Après plusieurs années, les arbres peuvent devenir la partie principale de la biomasse végétale. À ce stade, il est possible de réintroduire, dans des zones localisées qui constituent une fraction de l'agro-écosystème mature, des éléments perturbateurs tels que l'abattage des arbres et la plantation de cultures annuelles. Cette conception écologique du système agricole produirait de nombreux avantages, tels qu'une biodiversité accrue, une meilleure santé des sols et une plus grande résilience au changement. Le stade de maturité de ce modèle est une mosaïque dans laquelle les espèces pluriannuelles sont dominantes.

LA FERTILISATION CHIMIQUE FAVORISE CERTAINS PARASITES DES CULTURES

La fertilisation chimique telle que la fertilisation azotée favorise certains ravageurs comme les pucerons et les acariens. Par exemple, le puceron vert du pêcher (*Myzus persicae*) est favorisé par une augmentation de l'azote dans les feuilles du pêcher.⁶⁹⁴ Dans la culture du chou (plantes *Brassica*), la fertilisation azotée inorganique favorise les insectes herbivores. Un insecte phytophage, le thrips des fleurs occidentales (*Frankliniella occidentalis*), est très nuisible aux cultures horticoles, fruitières et florales, car il peut causer des dommages directs (piqûres sur les feuilles et les fleurs) et indirects (transmission de virus). L'augmentation de la présence de cet insecte ravageur dans la culture de la tomate a été liée à la fertilisation azotée. Dans les vergers de pommiers, la présence de la cochenille (*Pseudococcus comstocki*), dans les poiriers, la présence du psylle, et dans la culture du maïs, la présence de la pyrale, sont toutes favorisées par les engrais azotés inorganiques. L'application d'engrais azotés (urée) dans la culture du riz favorise les moustiques.

L'utilisation d'engrais organiques (fumier et compost au lieu d'engrais chimiques) augmente la fertilité des sols et, en même temps, réduit la contamination de l'eau par l'azote et le phosphore, ce qui entraîne une diminution des problèmes tels que l'eutrophisation et la présence de nitrates dans l'eau potable ; la capacité de rétention d'eau du sol est également améliorée de 20 à 40%.

Il a été démontré que le passage d'une fertilisation chimique à une fertilisation organique réduit la présence d'insectes herbivores et d'acariens. Ainsi, la qualité du sol favorise également les équilibres qui limitent les ravageurs des cultures. Dans le cas du maïs, la capacité de ponte de la pyrale dans les champs fertilisés avec des substances organiques était 18 fois inférieure à celle des champs fertilisés de manière conventionnelle, c'est-à-dire avec des engrais chimiques. La fertilisation organique (fumier, compost) favorise également la biodiversité et la fertilité, ce qui peut être favorisé par la culture de légumineuses, une pratique dont les bienfaits sont connus depuis des centaines d'années. Maintenir le sol couvert de végétation a également de nombreux effets positifs, notamment sur la faune.

RÉDUIRE L'UTILISATION DES PESTICIDES

Les agriculteurs qui utilisent des pesticides sont, dans la chaîne de production, les plus faibles et souvent les plus pauvres, même dans les pays industrialisés. Les agriculteurs sont exposés à des molécules toxiques tout au long de leur vie : le cancer du côlon, le cancer de la prostate, les lymphomes malins non hodgkiniens, la maladie d'Alzheimer, la maladie de Parkinson et les problèmes d'infertilité sont plus fréquents chez les agriculteurs français et leurs familles que dans la population générale ; en outre, les agriculteurs ont un taux de suicide plus élevé que le reste de la population (par exemple, 20% en France).^{230, 292, 293}

L'une des solutions les plus évidentes et les plus simples consiste à réduire l'utilisation des pesticides. La Communauté européenne propose de réduire de 50% l'utilisation des pesticides chimiques d'ici 2030 ; cet objectif doit être soutenu par la mise en œuvre d'initiatives de protection des pollinisateurs.¹¹⁸²

Une société tournée vers l'avenir devrait être en mesure de trouver des alternatives à la distribution de mélanges de substances toxiques sur des millions d'hectares. Il convient de souligner que probablement moins de 0,3% des ingrédients actifs utilisés par les agriculteurs dans les champs atteignent l'organisme et le site cible. Le reste se répartit dans l'environnement et certaines molécules persistantes (comme certains insecticides organochlorés) peuvent se retrouver dans la chaîne alimentaire et dans les tissus humains après des décennies et des milliers de kilomètres du site où elles ont été utilisées. Le sort de la planète dépend de la capacité de la société humaine à fixer des limites à sa capacité de destruction des pollinisateurs et autres, comme cela a été largement débattu.

Parmi les actions qui pourraient être entreprises dans le but de réduire l'utilisation des pesticides, plusieurs possibilités méritent d'être mentionnées :

- Surveillance et incitation au respect des règles, par exemple ne pas traiter avec des insecticides pendant la floraison. Les traitements contre les pucerons qui produisent les substances sucrées recherchées par les abeilles (et les autres animaux) devraient être réduits.

- Recensement et enregistrement de tous les traitements effectués dans l'agriculture et l'apiculture. Cette obligation est en place depuis des années, mais en réalité, les enregistrements sont très faibles. La traçabilité de la vente de tout pesticide par les producteurs, les commerçants, les vendeurs, les utilisateurs et les éliminateurs doit être garantie. Diverses informations pourraient également être enregistrées via Internet (par exemple, les lots, les quantités vendues ou utilisées par unité de surface, par parcelle et par culture). En Californie, le lieu et la date d'utilisation des pesticides sont enregistrés, ce qui fournit des informations très utiles également pour les études épidémiologiques : par exemple pour corréliser la fréquence accrue d'apparition de certaines maladies nerveuses suite à une exposition professionnelle aux pesticides.²⁹⁴

- Il serait utile d'étendre l'exigence selon laquelle tous les pesticides doivent être prescrits par du personnel qualifié (par exemple, un vétérinaire ou un agronome) des services publics (par exemple, le service de santé).³⁷⁵ Comme dans le domaine de la santé humaine, les agriculteurs ont également besoin de médecins des plantes. Trop souvent, les conseillers des agriculteurs sont les vendeurs de pesticides.

- Promouvoir des formes d'agriculture durable et biologique, comme c'est déjà en partie le cas en Europe. Augmenter la superficie des terres consacrées à l'agriculture biologique et durable et réduire la superficie des terres cultivées avec l'agriculture

chimique n'est plus un choix mais une nécessité. Nous ne pouvons plus nous permettre de continuer à produire des aliments sans prendre soin des sols, de l'eau et de la biodiversité. En Europe, l'agriculture biologique interdit l'utilisation de pesticides et de produits chimiques de synthèse (par exemple, les engrais). L'agriculture biologique est donc une forme de culture qu'il convient de promouvoir en remplacement de l'agriculture traditionnelle. L'agriculture biologique produit des rendements plus faibles mais présente de nombreux avantages, tels qu'un investissement économique moindre, une réduction des dommages environnementaux et des coûts de santé qui en découlent, qui ne sont pas actuellement pris en compte. Selon certaines recherches, les rendements de l'agriculture biologique sont inférieurs de 19,2% à ceux de l'agriculture conventionnelle : cette moyenne a été obtenue en comparant les résultats d'études menées dans 38 pays, sur 52 espèces cultivées pendant 35 ans ; la fourchette de différence des rendements a été estimée entre 15,5% et 22,9%.⁵³⁰ Les écarts peuvent varier considérablement d'un pays à l'autre et selon les cultures ; par exemple, il peut être de 180% dans les pays en développement. La différence de rendement entre l'agriculture biologique et l'agriculture conventionnelle peut être réduite pour certaines cultures en utilisant des pratiques culturales simples qui sont de bonnes pratiques agricoles, comme la rotation et la culture de plusieurs plantes en même temps. La rotation consiste à ne pas cultiver les mêmes plantes pendant plusieurs années consécutives sur les mêmes sols, comme c'est le cas pour les céréales. La rotation entre différentes cultures au lieu de la monoculture répétée sur de grandes parcelles présente de nombreux avantages environnementaux, comme la moindre probabilité de sélectionner des super nuisibles résistants aux pesticides : insectes ou mauvaises herbes. La rotation des cultures interrompt le cycle de vie des organismes attachés à une culture et l'utilisation de légumineuses permet d'enrichir le sol en azote. La différence de rendement entre la polyculture biologique et la monoculture conventionnelle peut atteindre 9% ($9 \pm 4\%$).⁵³⁰ La culture simultanée de plusieurs plantes est une stratégie écologique permettant de réduire les différences quantitatives entre l'agriculture conventionnelle et l'agriculture biologique. Les différences de rendement et autres inconvénients devraient être évalués de manière comparative, en essayant également de quantifier les dommages environnementaux et les risques sanitaires pour les agriculteurs, la population avoisinante et les consommateurs, ce qui n'est pas fait. L'agriculture biologique génère moins de réduction de la biodiversité, ce qui ajoute une valeur supplémentaire qui devrait être utilisée dans les estimations économiques.

- L'une des méthodes de production alimentaire considérées comme moins nocives pour l'environnement et moins dangereuses pour la santé est la "production intégrée". L'un des principes essentiels est l'évaluation préventive de la présence d'organismes nuisibles et l'évaluation économique des dommages éventuels. En définissant des seuils économiques d'intervention, on fixe des niveaux d'infestation en dessous desquels aucune action ne doit être entreprise. Cette évaluation devrait être effectuée avant toute utilisation de pesticides, ce qui est exactement le contraire de ce qui se passe aujourd'hui avec l'utilisation de semences enrobées d'insecticides comme les néonicotinoïdes ou de plantes génétiquement modifiées qui produisent des molécules biologiques à action insecticide. En réalité, on rend systématiquement les plantes toxiques pour la vie et pour tout le reste, avant même de savoir si les nuisibles seront là et s'ils causeront des dégâts importants.

- Une interdiction de l'utilisation des pesticides dans les espaces verts publics, les terrains de sport, les cimetières et les jardins privés, comme cela a été fait récemment en France.

- Restriction de la vente et de l'achat de pesticides. Actuellement, tout le monde peut acheter sur Internet des pesticides à usage non professionnel, même en bouteilles de 20 litres (par exemple, l'herbicide glyphosate). On estime que 82% des ménages américains utilisent des pesticides à la maison, en utilisant entre 3 et 4 ingrédients actifs différents.⁵⁰⁵ En raison notamment de cette utilisation abusive, certains contrôles révèlent la présence de 7 principes actifs différents dans le sang de 83% des mères et des enfants testés.⁵⁰⁵ L'exposition domestique peut être particulièrement dangereuse pour les enfants : on sait que l'exposition domestique aux pesticides, tant des parents (avant et pendant la grossesse) que des enfants immédiatement après la naissance, augmente la probabilité de leucémie chez les enfants (il s'agit de cancers qui peuvent survenir chez les enfants de moins de 5 ans).⁵¹⁵ L'interdiction des pesticides à usage domestique et, par conséquent, de leur commercialisation dans les supermarchés et la grande distribution est un objectif très utile et efficace pour réduire les coûts de santé et les dépenses inutiles.

- L'interdiction d'utiliser des pesticides pour améliorer l'apparence des fruits. Une partie des pesticides est utilisée pour améliorer des aspects esthétiques qui ne sont pas pertinents du point de vue de la qualité nutritionnelle. Ce type d'application devrait donc être interdit, comme cela a déjà été le cas dans certains pays comme le Canada (en 2009 en Ontario).⁵¹⁷ Les normes esthétiques commerciales devraient également être modifiées afin d'encourager une réduction de l'utilisation de ces poisons à cette fin.

- Augmenter les informations obligatoires sur les étiquettes des pesticides telles que la classe chimique à laquelle appartient la molécule, les composés présents en plus de l'ingrédient actif (100% des ingrédients devraient être indiqués) et les effets chroniques connus (par exemple comme perturbateurs endocriniens).

- Informer les consommateurs des pesticides utilisés par les agriculteurs pour chaque lot de produits alimentaires. Aujourd'hui encore, dans de nombreux réseaux commerciaux en Italie, il est difficile d'obtenir des informations qui sont obligatoires depuis des années, telles que les informations sur l'origine des fruits et légumes et le nom de la variété de légumes.

- Surveiller la qualité de l'eau qui peut être fortement contaminée par des pesticides, comme les herbicides. Dans les zones où l'eau propre est rare et où l'eau actuelle est contaminée, des zones de protection pourraient être établies dans lesquelles l'utilisation de toute matière active serait interdite (comme, dans certains cas, est réglementée la protection de l'eau contre la contamination par les nitrates des engrais chimiques).

- La rotation des cultures doit être appliquée, ainsi que les cultures intercalaires, afin de réduire les problèmes résultant de monocultures intensives répétées. Un exemple de culture mixte est appliqué au Mexique où l'on cultive ensemble du blé, des haricots et des courges.¹⁷⁵

- Toutes les maladies doivent être enregistrées et cataloguées à l'aide d'outils informatiques, afin que les informations souhaitées puissent être facilement collectées.

Par exemple, les registres du cancer de la population en Italie recueillent des informations sur les patients atteints de cancer résidant sur un territoire donné. Malheureusement, dans les hôpitaux italiens, tant publics que privés, les données relatives au diagnostic et au traitement du cancer ne sont pas toujours classées de manière détaillée et systématique. Pour suivre l'évolution des pathologies cancéreuses, il est donc nécessaire que quelqu'un se charge de rechercher activement des informations, de les coder, de les archiver et de les mettre à disposition pour les études et les recherches. Les registres italiens du cancer ont cette fonction et sont en place depuis la fin des années 1960.⁵⁷² Il serait utile de prévoir l'enregistrement, par tous les médecins et établissements de santé, publics et privés, des maladies enregistrées, y compris les cancers. Des registres spécifiques doivent être conçus pour les maladies professionnelles (par exemple, des apiculteurs et des viticulteurs) et pour des catégories particulières (par exemple, les maladies héréditaires). Les outils informatiques d'aujourd'hui permettent de réaliser ces enregistrements et catalogues rapidement et facilement, il s'agit donc d'une opportunité à ne pas laisser passer. L'absence de collecte de ces informations ralentit le progrès des connaissances et la capacité de la société à rassembler les preuves nécessaires pour tenter de réduire ou d'arrêter les risques générés par des intérêts privés, tels que l'industrie agrochimique.

- Promouvoir la culture de l'agriculture biologique et écologique. Il convient également d'encourager la recherche scientifique dans cette direction en favorisant des systèmes plus durables et autosuffisants. Les principes de circularité des flux (par exemple, le recyclage des substances organiques comme engrais) et d'autosuffisance, comme celui de la reproduction des plantes, doivent être abordés avec beaucoup d'énergie et de détermination.

- Formation et assistance aux agriculteurs et aux apiculteurs. L'indépendance vis-à-vis des conseils des grandes entreprises est une condition préalable à la diffusion d'une culture agro-écologique.²⁷¹ Il est nécessaire de construire un nouveau réseau qui diffuse les principes de l'agriculture durable et favorise une culture agronomique différente de celle qui domine actuellement dans les pays industrialisés.

Ce sont là quelques-unes des bonnes pratiques qui devraient également être encouragées par la formation universitaire et professionnelle des agriculteurs.²⁷¹ Un ancien système pour maintenir la fertilité du sol était la rotation de différentes cultures, telles que les céréales et les légumineuses (par exemple, blé, navets, orge et trèfle, en Grande-Bretagne, il y a plus de deux siècles).

Il y a maintenant au moins 30 ans que les premières études ont montré que la réduction de l'utilisation des pesticides n'entraînerait pas de diminution du rendement des cultures. Aux États-Unis, dans les années 1990, on a estimé qu'une réduction de 50% de l'utilisation des pesticides dans l'agriculture entraînerait une augmentation de 0,6% des coûts de production et aucune diminution des quantités.⁵³⁸ Cependant, cette estimation n'a pas évalué, en termes économiques, tous les bénéfices de la réduction des impacts négatifs sur la santé et l'environnement générés par une réduction de 50% de l'utilisation des pesticides.

L'interdiction totale de l'utilisation des pesticides est l'objectif ultime qui doit être fixé et qui doit nécessairement être atteint avec le développement d'une nouvelle culture agricole. Il est nécessaire de passer d'une agriculture chimique à une agriculture durable, et pour ce faire, le monde agricole actuel a besoin d'un soutien et de connaissances qui ne sont pas disponibles aujourd'hui. Les agriculteurs dépendent, dans tous leurs choix les plus importants, d'une culture monopolisée depuis plus de 50 ans par les multinationales et leurs technologies. Il est donc

nécessaire de construire et de diffuser des alternatives culturelles, et pour ce faire, une forte intervention de l'État est nécessaire. Nous devons passer d'un modèle dans lequel les bénéfices sont privatisés et les coûts environnementaux sont cédés et distribués dans la communauté, à un système dans lequel l'intérêt collectif et la durabilité doivent être les principes clés.

Jusqu'à ce qu'il soit prouvé que l'utilisation de pesticides génère des bénéfices indispensables et essentiels et, en même temps, ne provoque pas d'effets désastreux, leur utilisation devrait être suspendue.⁴⁴⁹ Malheureusement, si les problèmes générés sont bien connus, les avantages de certaines procédures telles que la distribution d'insecticides sur toute la planète (par exemple les néonicotinoïdes), avant de savoir si les nuisibles pourront créer des dégâts inacceptables, sont beaucoup moins clairs. Cela revient à ingérer des médicaments tels que des antibiotiques avant tout symptôme ou signe de danger imminent, et ce à vie.

LES LIMITES DE L'ÉVALUATION TOXICOLOGIQUE

Les tests d'évaluation de la toxicité aiguë présentent de nombreuses limites :

- Ils sont très influencés par les entreprises de pesticides et, dans la plupart des cas, ne sont réalisés que par leurs laboratoires internes et affiliés. En fait, les organismes publics de contrôle et d'autorisation jugent les documents et les résultats produits par les mêmes entreprises qui gèrent l'activité commerciale. Il s'agit clairement d'une situation de conflit d'intérêts très dangereuse qui doit être abordée. Certains des malentendus désagréables et dangereux entre contrôleurs et contrôlés sont rapportés dans des dizaines de publications et de documentaires.^{260, 280}

- Les méthodes expérimentales consistent à mesurer la toxicité en utilisant des doses qui génèrent des effets mesurables en quelques heures, de sorte qu'il n'y a pas d'informations sur les effets sublétaux et à long terme. Pour mieux comprendre, c'est comme si l'on essayait de savoir si la cigarette peut avoir un effet cancérigène en exposant des volontaires à des dizaines de cigarettes pendant une seule journée, puis en enregistrant ce qui se passe pendant une semaine. Le principe de toxicologie selon lequel de petites doses répétées dans le temps peuvent produire des effets indésirables identiques ou supérieurs à ceux d'une dose unique, même plus élevée, n'est pas pris en compte. On mesure la dose létale qui tue 50% des individus exposés par ingestion ou contact. Selon l'Organisation mondiale de la santé, les produits chimiques dont la toxicité est inférieure à 5 mg/kg de poids corporel pour les solides et à 20 mg/kg pour les liquides peuvent être considérés comme extrêmement dangereux. Si un pesticide a une dose létale (DL) pour l'homme de 20 mg/kg, cela signifie que 1.400 mg peuvent tuer un homme de 70 kg ; il est utile de comparer les DL₅₀ de certaines substances : 11.900 mg/kg de poids corporel pour la vitamine C, 3.000 mg/kg p.c. pour le sel de table, 15 mg/kg pour l'insecticide organophosphoré parathion, 10 mg/kg pour l'insecticide organochloré DDT, 0,5 mg/kg pour le cyanure ou la nicotine et 0,02 mg/kg pour la dioxine.²⁸⁰

- Un fait bien connu en toxicologie est que les effets chroniques d'une substance toxique n'ont pas, en principe, de valeur seuil (par exemple, les perturbateurs endocriniens et les substances mutagènes).

- Les effets synergiques et additifs ne sont pas faciles à mesurer car il faudrait effectuer des milliers de tests et, de toute façon, il est impossible de prévoir toutes les

combinaisons d'expositions possibles. On confond souvent les expositions en se concentrant sur les conséquences et non sur les causes. Par exemple, certains pesticides affaiblissent le système de défense des insectes, de sorte que les nuisibles prennent le dessus. Il devient facile de se concentrer sur un parasite tel qu'un acarien, et les virus qu'il transmet, car ils sont clairement visibles dans la colonie.

- Dans le cas des essais en plein champ, des colonies artificielles d'environ 10.000 abeilles, c'est-à-dire beaucoup moins que les colonies du printemps, sont placées pendant quelques jours à proximité d'un champ traité, dont la taille varie de 2.500 m² à 10.000 m² (1 ha).^{260, 857} Cette zone est trop petite et sous-estime donc l'exposition réelle : les abeilles ouvrières peuvent potentiellement se déplacer chaque jour dans une zone de plus de 100.000.000 de mètres carrés (100 km²). Ainsi, l'exposition peut être sous-estimée par un facteur de plus de 4 ordres de grandeur. Pour réduire cette source d'erreurs et d'imprécisions, il a été proposé en France d'utiliser des surfaces d'exposition d'au moins 2 hectares.⁸⁵⁷ Cependant, il est impossible d'empêcher les abeilles de se déplacer dans un rayon de plusieurs kilomètres et, par conséquent, il est impossible d'empêcher les expositions multiples et incontrôlées. Il s'ensuit qu'il n'y aura pas de différences significatives d'exposition entre les abeilles de contrôle (situées loin du champ expérimental) et celles qui participent au test (c'est comme si l'on essayait de mesurer les dommages générés par le tabagisme entre deux échantillons de personnes composés de fumeurs et de non-fumeurs : comme il n'y a pas de différences, les résultats permettent de conclure que le tabagisme ne génère pas de changements dans l'incidence du cancer).

- Certains types d'évaluation sont également difficiles à mettre en œuvre parce qu'ils sont imprévus ou non envisagés. Notamment, il a été démontré que le fait de semer des graines contenant des pesticides (par exemple des néonicotinoïdes) nuit aux abeilles dans les environs. Pourtant, les abeilles ne mangent pas les graines, mais l'exploitation distribue des pesticides dans l'environnement qui sont si puissants qu'ils nuisent aux insectes pendant les quelques minutes où ils survolent le champ de semis.

- Les tests de toxicité aiguë sont réalisés principalement sur des insectes adultes et pendant quelques heures, négligeant les stades juvéniles et les effets sur l'équilibre de toute la colonie.

- Très souvent, l'ingrédient actif qui est testé sur les abeilles, et dans d'autres études toxicologiques, constitue moins de 5% du poids de la formulation qui est distribuée sur le terrain. Par conséquent, les autres composants du mélange, qui peuvent dans certains cas être plus dangereux, ne sont pas évalués. Une fraction des ingrédients du mélange contenant des pesticides peut être considérée comme secrète, c'est-à-dire protégée par des lois et des brevets. Un exemple est l'herbicide à base d'alachlore qui pourrait être cancérigène pour l'homme (selon l'ONU), dont le nom commercial était *Lasso* et qui contenait des substances "secrètes" (7%) et de l'hexachlorobenzène (il représente 50% du produit et est neurotoxique).²⁸⁰ Le secret commercial a des répercussions sur la santé humaine et l'environnement. Il convient également d'évaluer les effets synergiques de plus de 100.000 molécules de synthèse que nous distribuons dans l'environnement depuis plus de 50 ans, avec les conséquences que l'on connaît : contamination de l'eau, de l'air et des aliments ; réduction de la biodiversité et augmentation des maladies chroniques chez l'homme. Une folie chimique sans précédent est en cours.

- Les métabolites ne sont pas pris en compte, c'est-à-dire les molécules qui sont produites par la dégradation spontanée des molécules d'origine ou qui se produisent au sein des êtres vivants. Certains métabolites, comme nous l'avons déjà expliqué, sont tout aussi ou plus dangereux que les molécules d'origine. En outre, ils peuvent être beaucoup plus persistants dans l'environnement et agir par des mécanismes et sur des sites différents de ceux pour lesquels ils sont utilisés (par exemple, les herbicides à action antibiotique et les insecticides à action hormonale).

- L'effet des pesticides sur les insectes sauvages n'est pas évalué, de sorte qu'aucune information à ce sujet n'est estimée dans la procédure d'autorisation (notamment parce que cela serait presque impossible). De nombreuses études ont montré que les abeilles domestiques sont plus résistantes aux pesticides que certaines espèces d'insectes sauvages, notamment parce que les abeilles ont un auxiliaire redoutable : l'apiculteur, qui les nourrit artificiellement, les déplace, nettoie les ruches mais utilise aussi des pesticides.

En conclusion, le mécanisme qui sous-tend la commercialisation des pesticides est très intuitif : les risques sont supportés par la communauté tandis que les entrepreneurs reçoivent les bénéfices. Les connaissances déjà disponibles devraient servir d'avertissement. Une approche holistique de la science fait souvent défaut. Le réductionnisme est allé trop loin : le nombre de spécialistes a augmenté et ils sont de moins en moins nombreux à essayer de fournir une image systémique et complète de la réalité. La faible capacité de la communauté scientifique à communiquer clairement les risques auxquels nous sommes confrontés est également une faiblesse. Ces faiblesses se manifestent également dans de nombreux autres domaines, tels que le changement climatique, la destruction de la biodiversité ou la pollution de l'eau.

DIVULGATION FAISANT AUTORITÉ, SCIENTIFIQUEMENT INCOMPLÈTE ET ÉTHIQUEMENT INCORRECTE

En conclusion, il est possible de dire que l'agriculture est probablement la principale cause des problèmes générés au monde des abeilles et des pollinisateurs. Paradoxalement, les principaux bénéficiaires en termes économiques du service de pollinisation (agriculteurs) et de la production de miel (apiculteurs) sont la principale cause de la mortalité des abeilles et, en général, de la réduction de la biodiversité. C'est un système qui s'autodétruit aveuglément depuis des décennies. Le système agricole est un patchwork de monocultures qui constituent un désert alimentaire et un environnement toxique pour les abeilles et les insectes tels que les pollinisateurs (et autres). Les seuls qui peuvent en bénéficier temporairement sont les ravageurs des cultures, qui disposent au contraire d'une réserve massive de nourriture en l'absence de concurrents et de facteurs limitants (pesticides mis à part, qui sélectionnent toutefois les plus résistants).

Un danger insidieux est la désinformation associée à l'ignorance. La diffusion d'informations inexacts et incorrectes peut entraîner un retard dangereux dans l'action sociale nécessaire. La prise de conscience collective et l'action positive qui peut en résulter sont craintes et entravées par des pouvoirs économiques forts. Les règles du marché, de l'économie et de la finance sont souvent présentées comme des forces obscures dont il est impossible de se défendre. Nous ne devons jamais oublier qu'elles ne sont rien d'autre qu'un produit de la culture humaine et non un astéroïde inévitable. Parmi les messages qui sont propagés pour répandre et cultiver le doute avec les effets néfastes qui en découlent, on peut citer les suivants :

- Le pesticide n'est dangereux que si de bonnes pratiques d'utilisation ne sont pas adoptées.⁸⁶⁹ Selon ce point de vue, les effets négatifs sur les insectes s'expliquent en partie par le mauvais travail de l'ouvrier qui a utilisé la molécule. Parmi les propositions inefficaces pour réduire les risques pour les abeilles et la population en général, citons l'utilisation d'un équipement de protection approprié pendant l'application et le respect d'un comportement et d'un mode de vie adéquats (par exemple, ne pas fumer). Ces actions, même si elles sont appliquées au mieux de la technologie disponible, peuvent contribuer à réduire l'exposition des seuls agriculteurs et autres opérateurs professionnellement exposés à ces poisons. Malheureusement, certains dispositifs de protection sont coûteux ou très inconfortables à porter en conditions réelles.

- L'une des stratégies les plus puissantes utilisées pour instiller le doute consiste à mettre en équation des dizaines de facteurs très différents, comme c'est le cas lorsqu'on tente d'expliquer la mort soudaine des abeilles. Parmi les messages diffusés par les médias non scientifiques ou à orientation non scientifique sur les causes de l'augmentation de la mortalité des abeilles figurent les vols d'avions et les champs électromagnétiques, tels que ceux produits par les antennes de téléphonie mobile.^{241, 482} On a découvert que les abeilles possèdent dans leur abdomen du fer (granules reliés aux neurones) qui leur permet de percevoir le champ magnétique terrestre et participe au mécanisme d'orientation du vol.²⁴³ Peut-être démontrera-t-on un jour que ces facteurs (par exemple, le vol des avions et les antennes) peuvent également affecter de manière significative la vie des abeilles, mais il est certainement préférable de ne pas se laisser distraire : nous disposons de suffisamment de preuves.²⁵⁴ Nous devons nous concentrer sur les problèmes évidents et avérés, tels que la mort des abeilles (et d'autres animaux comme les oiseaux) causée par les néonicotinoïdes et autres insecticides. L'instrumentalisation de la science pour semer et cultiver le doute est désormais un art très fin (et une profession bien rémunérée). C'est une arme sociale très ingénieuse : semer le doute à l'extérieur de l'entreprise pour faire accepter la molécule et à l'intérieur de l'entreprise pour maintenir sa production.

- C'est la dose qui fait le poison, selon le principe de Paracelse : de petites quantités ne représentent presque rien, il n'y aura donc aucun effet. Comme cela a déjà été expliqué, ce n'est pas le cas pour de nombreux mécanismes d'action, comme les substances mutagènes (potentiellement cancérogènes), les perturbateurs endocriniens ou les inhibiteurs des systèmes de défense.

- D'autres études et recherches sont nécessaires. L'opinion selon laquelle il ne faut rien faire en l'absence de preuves scientifiques solides est très inquiétante. La simple suspicion d'éventuels effets négatifs devrait déclencher l'application du principe de précaution. Jusqu'à ce que son innocuité soit prouvée, le produit ne doit pas être utilisé. Malheureusement, le pesticide est en fait utilisé jusqu'à ce que sa dangerosité ait été confirmée par des personnes extérieures aux fabricants. Ce travail est très coûteux et ne peut être laissé à la bonne volonté de petits groupes de recherche. De cette manière, les grandes entreprises gagnent du temps et rencontrent peu d'obstacles.

Un autre aspect intéressant concerne la sémantique des pesticides, qui sont passés du statut d'exterminateurs de parasites à celui de produits phytosanitaires et, enfin, à celui de produits phytopharmaceutiques. Au fil du temps, la toxicité des molécules commercialisées a augmenté, de 10 à 1000 fois pour chaque nouvelle génération de molécules (par exemple, si l'on

compare les fongicides à base de sulfate de cuivre, utilisés dans les vignobles depuis 1885, et ceux utilisés aujourd'hui comme le chlorothalonil, qui endommage l'ADN, ou l'époxiconazole, soupçonné d'être cancérigène et toxique pour la reproduction humaine).²⁸¹ Le monde de l'agro-industrie a tenté de nous rassurer par la sémantique. Un jeu de mots astucieux destiné à tromper et à détourner l'attention. Il faut toujours se rappeler que la fonction des pesticides est de tuer les êtres vivants, et ce le plus rapidement possible (y compris les humains, puisque de nombreuses molécules sont issues de la recherche militaire et ont été utilisées en guerre à de nombreuses reprises). L'art de l'évitement vise à détourner l'attention de ces concepts de base.

L'AGRICULTURE BIOLOGIQUE PRÉSENTE PLUSIEURS AVANTAGES

La diversification de l'écosystème agricole ne peut que générer des effets bénéfiques sur la biodiversité (par exemple, les pollinisateurs), la qualité du sol, la capacité de rétention d'eau, la séquestration du carbone, la gestion des éléments nutritifs des plantes, la lutte contre les maladies et les parasites des plantes et la productivité agricole.⁶¹⁰ La diversification des systèmes agricoles génère de nombreux effets positifs tels que la lutte naturelle contre les maladies et l'amélioration des services de pollinisation. Une stratégie gagnante consiste à encourager la recherche et l'application de ces connaissances pour accroître la résilience et l'adaptabilité à des changements tels que le changement climatique. La sécurité alimentaire exige d'accroître la durabilité des systèmes de production. L'augmentation de la biodiversité du système agricole peut être réalisée de plusieurs façons, notamment grâce à :

- la diversification des rotations de cultures ;
- la culture de différentes plantes (par exemple, des variétés adaptées aux conditions locales) ;
- la consociation ;
- la non-culture des zones proches des champs agricoles (par exemple, les bandes ou les bordures non cultivées) ;
- la réduction du travail du sol ;
- la réduction de l'utilisation des pesticides ;
- l'utilisation d'engrais organiques au lieu d'engrais chimiques ;
- la culture de vergers au lieu de cultures annuelles (systèmes agroforestiers).

Promouvoir la biodiversité agricole signifie renforcer les services naturels fournis par les écosystèmes qui profitent également à la production alimentaire, comme les insectes bénéfiques tels que les pollinisateurs. Il est prouvé que l'agriculture biologique, c'est-à-dire l'agriculture qui n'utilise pas de pesticides de synthèse, accroît localement la biodiversité par rapport à l'agriculture traditionnelle.

La présence de champignons mycorhiziens et, en général, de champignons symbiotiques avec les racines des plantes est favorisée par l'agriculture biologique, permettant une meilleure croissance et production des plantes. La culture selon des critères durables réduit jusqu'à quatre fois l'érosion des sols et améliore la teneur en nutriments et la disponibilité des plantes.

Dans l'agriculture biologique en général, les organismes sont 50% plus abondants et le nombre d'espèces augmente rapidement de plus de 30%.⁶¹⁰ Le nombre d'arthropodes prédateurs (ennemis naturels des ravageurs des plantes) et de décomposeurs du sol (organismes qui recyclent la matière organique) augmente également. En Allemagne, la culture biologique du blé, comparée à l'agriculture chimique, a augmenté la richesse des pollinisateurs de 60% et leur abondance de plus de 130%.⁶¹⁰

La culture du colza biologique au Canada, par rapport aux plantes chimiques et génétiquement modifiées (utilisant des pesticides tels que les herbicides), a vu le nombre de graines augmenter de 3 à 6 fois, principalement en raison de l'augmentation des pollinisateurs. ⁶¹⁰

La conversion de la culture traditionnelle des fraises à l'agriculture biologique présente des avantages significatifs en matière de succès de la pollinisation. Dans l'agriculture biologique, dès les premières années après la conversion (2-4 ans), le succès de la pollinisation est plus élevé : 45% des plants de fraises sont entièrement pollinisés dans l'agriculture biologique, contre 17% dans l'agriculture conventionnelle. ⁶¹⁸ La méthode de culture qui n'utilise pas ou réduit l'utilisation de pesticides augmente le service rendu par les pollinisateurs (par exemple, augmente le nombre d'espèces de papillons) et profite également aux agriculteurs. En effet, le nombre de fruits présentant des défauts est plus faible dans les champs cultivés biologiquement que dans ceux cultivés conventionnellement. Des résultats similaires ont été enregistrés dans d'autres cultures comme la pastèque. ⁶¹⁸ Le service de pollinisation de la pastèque (*Citrullus lanatus*) fait appel à des insectes pour transporter le pollen des fleurs mâles aux fleurs femelles, présentes sur la même plante. Les fleurs de pastèque ne sont actives que pendant un jour et doivent recevoir au moins 1.400 grains de pollen pendant la journée. Une étude menée aux États-Unis a révélé que 65% des producteurs de pastèques (dans certaines régions) possèdent des colonies d'abeilles ou louent les services d'apiculteurs : 4,5 ruches d'*Apis mellifera* sont utilisées par hectare, pour un prix compris entre 60 et 75 dollars par colonie. ⁷⁶⁰ Malgré cette aide, qui représente un coût supplémentaire, les chercheurs ont montré que 62% du transport du pollen dans les fleurs de pastèque est assuré par les abeilles sauvages : les abeilles d'élevage n'y contribuent qu'à hauteur de 38% et coûtent plus de 250 dollars par hectare chaque année.

De petites variations des conditions environnementales peuvent affecter considérablement le service de pollinisation. Les amandes de Californie sont connues pour être pollinisées par les abeilles domestiques. Des recherches ont montré qu'en présence de pollinisateurs sauvages et en l'absence de vent, les abeilles préfèrent visiter les fleurs supérieures et les espèces sauvages les fleurs inférieures. En présence de vent, les abeilles préfèrent visiter les fleurs les plus basses, et si le vent dépasse 2,5 mètres par seconde, les abeilles domestiques ne visitent aucune fleur, tandis que certains insectes sauvages continuent à faire un travail utile pour les agriculteurs. ⁶¹³ Cette simple observation confirme l'utilité de la présence des pollinisateurs sauvages, qui complètent et compensent le travail effectué par les abeilles d'élevage, rendant le système agricole plus résistant aux changements.

Il existe de nombreuses espèces importantes d'insectes pollinisateurs sauvages en Europe, par exemple : *Andrena flavipes*, *Andrena labiata*, *Anthophora plumipes*, *Bombus hortorum*, *Bombus lapidarius*, *Bombus pascuorum*, *Bombus terrestris*, *Megachile rotundata*, *Osmia cornifrons*, *Osmia cornutae*, *Osmia bicorni*. ⁷³³ L'importance de la présence de zones sauvages ou semi-naturelles pour assurer la pollinisation par des espèces sauvages est confirmée par le fait que les cultures situées à plus de 1,5 km des zones de refuge de biodiversité reçoivent des insectes dans leurs fleurs avec une intensité 50% moindre que les zones proches des zones de refuge. ⁷³³ De nombreuses études montrent que cette relation est importante. Par exemple, le fait de consacrer un dixième de la superficie cultivée en pastèques à des zones semi-naturelles garantit la survie de pollinisateurs capables de fournir plus de 40% du service de pollinisation nécessaire à cette culture. ⁷³³ Le maintien des espaces naturels, associé à une gestion plus durable du système agricole (par exemple sans pesticides, comme c'est le cas avec l'agriculture biologique), garantit la survie d'équilibres qui sont également essentiels pour l'économie agricole.

L'Union européenne a des objectifs ambitieux : ¹¹⁸²

"L'agroécologie peut à la fois fournir des aliments sains sans altérer la productivité, mais aussi accroître la biodiversité et la fertilité des sols et réduire

L'empreinte de la production alimentaire. L'agriculture biologique, en particulier, offre un grand potentiel tant pour les agriculteurs que pour les consommateurs : c'est un secteur qui non seulement crée des emplois et attire les jeunes agriculteurs, mais qui offre également 10 à 20% d'emplois en plus par hectare que les exploitations conventionnelles et crée de la valeur ajoutée pour les produits agricoles. Pour tirer le meilleur parti de ce potentiel, au moins 25% des terres agricoles de l'UE doivent être consacrées à l'agriculture biologique d'ici à 2030. "

L'agriculture biologique, si elle ne repose que sur la réduction ou la non-utilisation des pesticides, ne peut répondre à toutes les attentes d'un système durable. L'agriculture biologique présente de nombreuses faiblesses, telles que :

- l'utilisation des mêmes variétés de plantes que dans l'agriculture traditionnelle : 95% de l'agriculture biologique utilise les mêmes cultures que l'agriculture chimique.

- Elle ne prescrit pas l'utilisation d'autres bonnes pratiques agronomiques telles que les rotations, la polyculture, l'absence de travail du sol, le sol toujours couvert de végétation, l'absence de fertilisation chimique, etc.

- Elle n'encourage pas la diversification. En effet, il est prouvé que de petites parcelles cultivant différentes espèces sont plus productives que la même zone occupée par des monocultures et, en même temps, sont plus résistantes au changement. Souvent, l'agriculture biologique n'exploite pas les facteurs locaux qui la rendraient plus efficace, plus résiliente et plus compétitive que l'agriculture conventionnelle.

Un autre aspect critique est que l'agriculture biologique en Italie est contrôlée par quelques entités privées (environ 14) qui sont à leur tour gérées par un seul organisme privé (ACCREDIA). Les contrôles sont effectués par des organismes privés soutenus financièrement par leurs contrôleurs. La condition de conflit d'intérêts est très évidente. C'est un système autoréférentiel qui ne stimule pas les améliorations dans l'adoption de nouvelles pratiques agro-durables. Il n'y a aucune incitation à l'expérimentation et à la confrontation : c'est un système rigide qui encourage l'homologation des comportements et manque de transparence. Il n'est pas surprenant que des doutes subsistent quant au caractère écologique d'achats vertueux tels que les aliments certifiés biologiques. Il pourrait s'agir d'une autre forme de publicité et de commerce qui ne modifie pas l'ordre établi et encourage l'achat de produits plus chers. Ce sont toujours les mêmes monocultures, souvent cultivées sur de grandes extensions et en monoculture, vendues dans les mêmes temples du marché : les supermarchés et les grandes surfaces. Comment est-il possible que l'agriculture traditionnelle, qui cultive les mêmes plantes, ne parvienne pas à abandonner les pesticides (et vice versa) ? Espérons que l'alimentation naturelle ne restera pas un rêve. L'agriculture naturelle n'a peut-être jamais existé et ne peut exister dans une société moderne. Il n'existe pas de solutions indolores, tout comme l'idée que nous ne pouvons pas changer notre vision est dramatique.

L'AGRICULTURE ÉCOLOGIQUE PEUT CONTRIBUER À ATTÉNUER LES CAUSES DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Les pratiques agronomiques intensives augmentent les émissions de gaz qui altèrent le climat, aggravant ainsi une situation déjà grave. Les pratiques agronomiques qui peuvent réduire la production de gaz nocifs pour le climat consistent à laisser le terrain sans couverture végétale, à ne pas labourer le sol et à laisser pousser des plantes annuelles entre les rangées d'arbres. Le seul fait de ne pas travailler le sol pourrait augmenter la quantité de carbone séquestré d'environ 31 g par mètre carré et par an.

En général, l'agriculture biologique utilise moins d'énergie et est plus efficace en termes de rapport entre l'énergie consommée et l'énergie produite que l'agriculture chimique. Elle a donc un impact beaucoup plus faible sur le climat. En quinze ans d'agriculture biologique, la substance organique du sol peut être doublée par rapport à l'agriculture conventionnelle (elle augmente le carbone organique du sol).⁶¹⁰ L'agriculture durable a le potentiel de séquestrer dans le sol une proportion importante du dioxyde de carbone émis par les activités humaines : entre 5 et 15% selon les estimations.⁶¹⁰ D'autres études estiment qu'une fraction beaucoup plus importante des émissions actuelles peut être séquestrée dans les sols agricoles et la végétation en modifiant les systèmes de production.¹¹⁸¹ Des essais sur le terrain ont montré que l'application de pratiques durables, telles que celles de l'agriculture dite régénérative et biologique, pouvait éliminer de l'atmosphère trois tonnes de carbone par hectare et par an. Si ces pratiques, telles que la non-utilisation d'engrais chimiques, l'absence de pesticides, l'absence de labour, le maintien d'un sol couvert de végétation en permanence, l'utilisation d'engrais organiques (compost, fumier), les rotations et les cultures intercalaires, étaient étendues à l'ensemble des terres agricoles du monde, on pourrait espérer que de grandes quantités de gaz altérant le climat pourraient être transférées de l'atmosphère vers le sol et la végétation.¹¹⁸¹ L'application de ces pratiques agronomiques pourrait même augmenter les rendements et réduire les besoins en énergie fossile.

L'irrigation est une autre pratique agricole qui consomme de l'énergie et génère divers coûts directs et indirects. Le choix de systèmes agricoles économes en eau deviendra une priorité dans de nombreux écosystèmes en raison des changements en cours. La diversification et la diffusion de l'agriculture rendent le système de production plus résistant aux conditions extrêmes telles que la sécheresse.

Enfin, certains des objectifs proposés par la Communauté européenne sont résumés (Plan de restauration de la nature de l'UE : principaux engagements d'ici 2030) :¹¹⁸²

- 1. D'ici 2030 : de vastes zones d'écosystèmes dégradés sont restaurées.*
- 2. Inverser la tendance au déclin des pollinisateurs.*
- 3. Réduire de 50% les risques et l'utilisation des pesticides chimiques.*
- 4. Affecter au moins 10% des terres agricoles à des éléments paysagers présentant une grande diversité.*
- 5. Utiliser au moins 25% des terres agricoles pour l'agriculture biologique et augmenter de manière significative l'adoption de pratiques agro-écologiques.*
- 6. Planter trois milliards de nouveaux arbres dans l'Union, en respectant pleinement les principes écologiques.*
- 7. Des progrès significatifs dans l'assainissement des sols contaminés.*
- 8. Restaurer au moins 25.000 km de rivières à écoulement libre.*
- 9. Réduire de 50% le nombre d'espèces figurant sur la liste rouge menacées par des espèces exotiques envahissantes.*
- 10. Réduire d'au moins 50% les pertes d'éléments nutritifs dans les engrais, en obtenant une réduction d'au moins 20% de l'utilisation des engrais.*
- 11. Doter les villes d'au moins 20.000 habitants d'un plan ambitieux de verdissement urbain.*
- 12. Éliminer l'utilisation de pesticides chimiques dans les zones sensibles, telles que les espaces verts urbains dans l'UE.*
- 13. Réduire substantiellement les effets négatifs de la pêche et de l'exploitation minière sur les espèces et les habitats sensibles, y compris les fonds marins, dans le but de leur redonner un bon état écologique. L'UE devrait également utiliser son influence diplomatique et ses capacités de mobilisation pour faciliter un accord sur la désignation de trois zones marines protégées dans l'océan Antarctique.*

14. Éliminer les prises accessoires de la pêche ou les réduire à un niveau qui permette la reconstitution et la conservation des espèces.

La seule façon de préserver la qualité et la continuité de la vie humaine sur Terre est de protéger et de restaurer la biodiversité.

LA PRODUCTION INTÉGRÉE ET BIOLOGIQUE EN APICULTURE

Le marché mondial des denrées alimentaires se compose principalement de quelques catégories : les produits traditionnels (les pesticides sont autorisés), les produits génétiquement modifiés (là encore, les pesticides sont autorisés) et, dans de nombreux pays, les produits biologiques (où les pesticides de synthèse ne doivent pas être utilisés) et la production intégrée (où les pesticides ne doivent être utilisés qu'après l'établissement de seuils économiques). Les alternatives agro-écologiques ou plus durables n'existent guère ou ne sont pas importantes dans les pays industrialisés. L'agriculture biologique occupe à elle seule une position de niche et ne présente pas toutes les exigences écologiques qui devraient être requises : il s'agit toujours d'une monoculture. L'apiculture biologique utilise également des méthodes artificielles qui modifient la biologie de la colonie et, là aussi, des produits chimiques doivent être utilisés (par exemple, l'acide oxalique qui se décompose en formaldéhyde et en acide formique). Le blocage du couvain mâle et l'essaimage, pour donner d'autres exemples, sont autorisés, c'est-à-dire des pratiques qui modifient le cycle naturel.⁹⁷³

Les principes de la production intégrée ont également été adoptés par les apiculteurs. Certains des principes contenus dans le cahier des charges de la production intégrée de miel sont les suivants :⁷⁴⁶

- *Une distance linéaire minimale de 1.000 m doit être respectée par rapport aux grands centres urbains, aux autoroutes, aux périphériques et aux autoroutes, aux zones industrielles, aux raffineries de sucre, aux décharges et aux incinérateurs de déchets.*
- *L'implantation du rucher à l'intérieur des centres urbains est interdite.*
- *Il est conseillé d'installer le rucher dans des parcelles de terre exploitées selon les principes de l'agriculture biologique ou selon des techniques agricoles à faible impact environnemental. En l'absence d'exploitations et/ou de cultures conduites selon les méthodes ci-dessus, et/ou en complément de celles-ci, il est conseillé de privilégier les exploitations présentant des composantes naturelles de rééquilibrage de l'agrosystème (haies, fourrés, bosquets, etc.).*
- *Il est interdit d'utiliser du plastique pour la construction d'éléments structurels à l'intérieur de la ruche. Il est également interdit d'utiliser de la peinture de quelque nature que ce soit à l'intérieur de la ruche.*
- *L'alimentation artificielle de la famille est autorisée jusqu'à 15 jours avant le début de la récolte. L'utilisation d'hydrolysats d'amidon est interdite en tout temps.*
- *Le *Bacillus thuringiensis* et le dioxyde de soufre, quelle que soit la manière dont ils sont produits et/ou administrés, peuvent être utilisés pour protéger les peignes (stockés) contre les mites de la cire (*Galleria mellonella* et *Achroia grisella*). Il convient de remarquer que la bactérie *Bacillus thuringiensis* pourrait être un produit biotechnologique ou un organisme génétiquement modifié.*
- *Il est recommandé de remplacer la cire de nidification au moins tous les cinq ans. Seule la cire d'abeille stérilisée doit être utilisée pour renouveler la cire. La cire accumule des polluants qui sont dangereux pour les abeilles, mais comment se*

- procurer de la cire non contaminée ? La stérilisation par la chaleur élimine les parasites, mais de nombreux principes actifs sont résistants aux hautes températures.
- *Les hautes températures (vapeur, flamme directe), les radiations, la soude caustique, la solution d'hypochlorite de sodium (eau de Javel) peuvent être utilisées pour désinfecter les ruches.*
 - *Le traitement pharmacologique doit répondre à la condition d'indispensabilité, c'est-à-dire qu'il doit être réalisé lorsque les mesures préventives s'avèrent insuffisantes et que les interventions techniques autres que la pharmacothérapie sont inadéquates. En outre, il ne faut pas donner à la pharmacothérapie un rôle préventif. En réalité, l'utilisation de médicaments (par exemple, acaricides et fongicides) par les apiculteurs est autorisée.*
 - *Dans le cas de pathogènes tels que la loque américaine (*Paenibacillus larvae*) ou la loque européenne (*Melissococcus pluton*), la destruction par incinération des colonies et la désinfection des ruches et du matériel doivent être prévues. La fumagilline peut être utilisée pour lutter contre la nosérose (*Nosema apis*), et le bromopropylate, le thymol, l'eucalyptol, le menthol et le camphre peuvent être utilisés pour lutter contre les acariens (*Aracapis woodi*), à condition de respecter le délai d'attente entre le traitement et la récolte du miel. Des substances telles que le coumaphos peuvent également être utilisées pour lutter contre *Varroa jacobsoni*. Il convient de remarquer que l'obligation de détruire les colonies décourage probablement l'autodéclaration et que des matières actives très dangereuses, comme le coumaphos, sont autorisées.*
 - *Pendant toutes les opérations, de l'extraction à la mise en pot du miel, il est interdit de travailler à des températures supérieures à 40°C.*
 - *L'utilisation de récipients en plastique pour le rempotage ou le stockage est interdite.*
 - *Le miel doit être conservé pendant une période maximale de 24 mois à compter de la date d'extraction (durée de conservation minimale).*
 - *Les résidus de pesticides doivent être inférieurs à 0,01 mg/kg.*
 - *Les ruches doivent être placées au-dessus de 900 m d'altitude.*

Ces règles permettent de nombreuses réflexions. Par exemple, le cahier des charges de la production intégrée de miel interdit le positionnement des ruches dans les centres urbains, mais de nombreux apiculteurs affirment que les espaces verts urbains sont plus sains pour les abeilles que les champs utilisés pour les monocultures, où les abeilles meurent à cause des pesticides et de l'absence de fleurs. L'utilisation de nouveaux systèmes de contrôle est autorisée, comme les toxines produites par le micro-organisme du sol *Bacillus thuringiensis*, qui peut être modifié par génie génétique. Les pesticides tels que les acaricides sont autorisés et aucun seuil économique d'intervention n'est fixé. Le cahier des charges de la production intégrée fixe également des exigences minimales de qualité pour certaines catégories de miel. Le miel de robinier ou acacia (*Robinia pseudoacacia*) provient d'une plante à épines, à feuilles caduques et à fleurs blanches en grappes, introduite en Europe au XVIIe siècle en provenance d'Amérique du Nord, initialement cultivée à des fins ornementales, aujourd'hui sauvage sur tout le territoire, souvent comme un véritable ravageur. Le miel d'acacia doit contenir en moyenne 8.500 grains de pollen de cette plante par 10 g, ce qui doit représenter au moins 15% du pollen contenu dans le miel.⁷⁴⁶ Dans le cas du miel d'agrumes, il doit y avoir une moyenne de 8.900 grains de pollen par 10 g, ce qui doit représenter plus de 10% du pollen présent ; dans le cas du miel de châtaignier (*Castanea sativa*) ou du miel d'eucalyptus (*Eucalyptus camaldulensis*), 90% des grains de pollen doivent provenir de chacune de ces plantes.

Des règles de production plus restrictives sont utilisées dans l'apiculture biologique. Malheureusement, même dans l'apiculture, les tentatives de diffusion de la culture écologique

sont encore inefficaces et très faibles. Par exemple, les ruches placées dans des monocultures chimiques pour favoriser la pollinisation conservent le statut de ruches biologiques, mais le produit ne peut être vendu avec la référence à l'agriculture biologique. Une autre règle ambiguë, difficile à faire respecter, prévoit que pour que le miel soit certifié biologique, les ruches doivent être situées au centre d'une zone d'au moins 3 km cultivée selon les principes de l'agriculture biologique. Trouver des zones aussi vastes sans agriculture chimique est une mission difficile, et de fait, des expressions telles que les suivantes figurent dans le cahier des charges : ⁷⁵¹

"...les cultures situées dans un *rayon d'au moins 3 km du rucher sont constituées ESSENTIELLEMENT de cultures biologiques et/ou de flore sauvage...*".

En outre, les ruches doivent être situées à plus d'un kilomètre des centres urbains, des autoroutes, des décharges, etc. Dans certains cas, une altitude minimale de plus de 900 m au-dessus du niveau de la mer est également suggérée. Dans la plupart des environnements agricoles, ces conditions sont presque inexistantes. Une bonne idée serait de cartographier les zones où il n'est absolument pas possible d'obtenir du miel biologique et celles qui s'y prêtent. En fait, les ruches peuvent être placées près des cultures traditionnelles si elles ne sont pas en fleurs. Le nomadisme est également autorisé pour l'apiculture biologique. Essentiellement, la contamination par les pesticides du miel dit biologique ne peut être évitée. Les pesticides ne sont pas autorisés en apiculture biologique, mais certaines molécules chimiques peuvent être utilisées, notamment contre les acariens (*Varroa destructor*), comme l'acide formique, l'acide lactique, l'acide acétique, l'acide oxalique, le menthol, le thymol et l'eucalyptol. Ces substances, considérées comme moins dangereuses, sont néanmoins nocives tant pour les insectes que pour les opérateurs qui les utilisent. Par exemple, les informations contenues dans la littérature sur les produits à base d'acide oxalique ne sont pas très rassurantes : il est nocif en cas d'ingestion ou de contact avec la peau ; il provoque de graves lésions oculaires. Il s'ensuit que pendant l'utilisation, on doit se protéger les yeux (avec des lunettes de protection bien ajustées), la peau et les mains (les gants doivent être en caoutchouc nitrile de 0,11 mm d'épaisseur et garantir un temps de perméation de plus de 480 minutes, donc très protecteurs). Pour la protection des voies respiratoires, il faut porter un masque (avec filtre de type P2) ayant une capacité de rétention moyenne des particules solides ou aérosols irritantes ou nocives. Lorsqu'il est fortement chauffé, l'acide oxalique forme des mélanges explosifs avec l'air. Les produits de décomposition listés dans la fiche technique de l'acide oxalique comprennent le formaldéhyde, l'acide formique et le monoxyde de carbone. Le formaldéhyde (ou méthanal, CH₂O) est un puissant bactéricide : en 2004, il a été classé par le CIRC comme un composé du groupe I, c'est-à-dire un cancérigène certain. ⁹²¹ Depuis 2016, le formaldéhyde est passé de la classification européenne "*suspecté de causer le cancer*" à "*peut causer le cancer*". ⁹²² Le formaldéhyde provoque de graves brûlures de la peau et des lésions oculaires, peut provoquer une réaction allergique de la peau, peut irriter les voies respiratoires de l'opérateur et est soupçonné de provoquer des modifications génétiques (informations données dans la fiche de données de sécurité). ⁹²³ Ainsi, même les produits autorisés en apiculture biologique peuvent être très dangereux.

Les aliments à base de sucres, de sirop de mélasse sont autorisés pour autant qu'ils soient issus de l'agriculture biologique. Il serait intéressant d'étudier dans quelle mesure cette restriction est respectée, car les aliments certifiés, comme le saccharose biologique, sont beaucoup plus chers.

Les autres points faibles de ces mécanismes sont les coûts de la certification et des contrôles, qui sont supportés par l'apiculteur et/ou l'agriculteur, dans le cadre d'une négociation avec le secteur privé. Cela signifie que les sociétés privées (au moins 14 en Italie) ayant le rôle officiel d'organismes de contrôle sont en fait les clients de leurs contrôleurs. ⁷⁵² Ce mécanisme génère des situations de conflit d'intérêts et porte atteinte à la nécessaire impartialité.

L'apiculture qui se veut plus écologique se base sur des principes qui ont été développés par différentes organisations. Le *permafarming* vise à fournir aux abeilles les conditions les moins artificielles possibles. La philosophie est de ne rien faire, c'est-à-dire de laisser les abeilles agir à leur guise.⁹⁷³ En effet, comment développer des écotypes d'abeilles adaptés à différents environnements et résistants aux parasites si toutes les étapes biologiques sont constamment et systématiquement interférées ? Les pratiques apicoles modernes empêchent l'autodéfense de l'espèce. Les interférences permanentes avec le cycle de vie des abeilles et dans les écosystèmes agricoles contribuent au déclin des abeilles. Certains des principes de l'apiculture durable sont résumés ci-dessous :

- Favoriser la sédentarité (le nomadisme est contré).
- Ne pas commercialiser de reines d'abeilles et ne pas acheter d'abeilles venant de loin.
- Privilégier les modes de reproduction naturels de la colonie (par exemple, l'essaimage naturel uniquement) et les écotypes locaux. Ne pas entraver l'essaimage naturel nécessaire à la reproduction naturelle de la colonie. La suppression des cellules réelles est interdite.
- Ne pas effectuer d'insémination artificielle.
- Ne pas bloquer le couvain mâle.
- Ne pas combiner des colonies faibles dans le but d'obtenir des colonies moins nombreuses mais plus fortes. Cette pratique est utilisée par les apiculteurs pour éviter que les colonies faibles ne succombent : des cadres entiers sont déplacés d'une ruche à l'autre.
- Ne pas utiliser de pesticides, d'antibiotiques ou d'autres produits synthétiques.
- Ne pas recycler la cire et, par conséquent, ne pas fournir d'eau de Cologne avec des feuilles pré-imprimées (les feuilles de cire et les cadres mobiles ne sont pas utilisés).
- Réduire la fréquence des inspections des ruches. L'utilisation de ruches (comme les ruches en paille) dans lesquelles il n'est pas possible d'inspecter l'intérieur de la colonie est interdite dans de nombreux pays du monde ; ceci est justifié par l'impossibilité de diagnostiquer facilement la présence de parasites.
- Ne pas utiliser de pièces en métal ou en plastique pour construire les ruches (utiliser uniquement du bois).
- Réduire la quantité d'aliments à moins de 8 kg de sucre par colonie et par an, ou utiliser uniquement du miel ou du pollen. Il existe une tendance à éviter ou à interdire l'utilisation des aliments pour animaux.
- Réduire les interventions au plus petit nombre possible (par exemple, ne pas utiliser de grille à reine mécanique pour arrêter la ponte afin de lutter contre les parasites tels que les acariens ; ne pas couper l'aile de la reine pour arrêter l'essaimage ; ne pas utiliser de fumée ; ne pas détruire les cellules de la reine pour empêcher l'essaimage ; faire le moins d'inspections possible).
- Réduire la densité des colonies par unité de surface.
- La ruche doit être placée à une hauteur élevée au-dessus du sol (2-5 m).
- Aucun déplacement de rayons ou d'abeilles d'une colonie à l'autre.
- Réduire le prélèvement de miel pour ne pas affaiblir la colonie et éviter de devoir fournir de la nourriture.
- Augmenter la biodiversité végétale dans les zones proches des ruches : cultiver pour nourrir les abeilles.
- Ne pas placer de ruches à proximité de zones agricoles traditionnelles : monocultures qui utilisent des pesticides.

Il s'agit d'une série de mesures visant à rendre moins artificiel ce qui reste un élevage intensif d'animaux qui ne peuvent survivre sans le soutien de l'apiculteur. Les agriculteurs considèrent que l'application de ces principes pour une apiculture durable n'est pas viable économiquement.

RENDRE LA COMMUNAUTÉ ÉCO-ALPHABÈTE

L'amélioration du système d'éducation et de formation peut favoriser une culture plus sensible aux questions environnementales et, surtout, plus consciente de la nécessité de ne pas dépasser les limites imposées par des ressources finies. Nous pourrions parler d'alphabétisation environnementale, étant donné qu'à l'heure actuelle, la plupart des gens vivent dans des lieux artificiels et n'ont pas conscience de la gravité de l'urgence environnementale. Les villes sont complètement déconnectées de la nature, et pour cette raison aussi, l'ignorance environnementale est endémique. Nous devons nous reconnecter avec le monde de la nature et redécouvrir ses règles et ses limites. Si nous parvenons à diffuser ne serait-ce que quelques principes moraux et écologiques solides dans la culture générale, nous serons en mesure d'inculquer une quantité énorme de comportements durables qui ne peuvent être obtenus avec des milliers de lois. L'apathie actuelle à l'égard des problèmes environnementaux est très contre-productive. Il faut reconfigurer les règles sociales et culturelles, tant au sein de la famille que dans le système scolaire, dans le sens d'une plus grande connaissance et d'un respect plus attentif des principes qui régissent les équilibres naturels dont nous dépendons.

Le consumérisme et les règles économiques par lesquelles nous nous gouvernons sont de nature "cannibale", détruisant les ressources environnementales et exploitant les êtres humains, sur la base de l'existence de grandes différences dans l'accès aux opportunités. Par exemple, si l'eau est considérée comme un bien commun, tout le monde a intérêt à la préserver et à éviter sa pollution. Si, en revanche, l'eau est traitée comme n'importe quelle autre marchandise ou vendue dans le cadre d'un monopole, l'objectif principal sera de maximiser les profits.

L'une des ressources les plus importantes pour combattre le consumérisme est la croissance culturelle à travers un système éducatif qui stimule la liberté de critique et le sens des responsabilités dans le choix des valeurs et des modèles de vie. Un investissement accru dans le sérieux, la rigueur et la sélectivité de l'enseignement public peut porter beaucoup plus de fruits qu'un investissement monétaire. Peut-être pouvons-nous envisager un système qui peut être amélioré, d'abord par la gestion et ensuite, éventuellement, par des ressources économiques plus importantes, comme la chance. Mais il n'est ni facile ni rapide de changer la façon de penser et d'agir d'une génération.

L'analphabétisme environnemental, qui règne et se répand de plus en plus dans notre société, est favorisé par un système de diffusion de l'information, d'éducation, scolaire et universitaire, qui est souvent incapable de promouvoir le changement culturel nécessaire. Nous pouvons choisir d'investir des ressources dans la culture ou dans les armes ou le béton, c'est-à-dire que nous pouvons peut-être encore décider comment préparer la prochaine génération à des changements et des défis sans précédent et inquiétants. Plus de culture signifie aussi devoir expliquer aux jeunes que les dégâts ont souvent été causés par les institutions mêmes vers lesquelles nous nous sommes historiquement tournés pour trouver des solutions : le marché, la politique, le système éducatif, les administrateurs.

La société capitaliste et industrielle moderne transforme les biens communs en capital et les détruit. Il en résulte que la majorité de la population mondiale vit dans les villes, avec un niveau alarmant d'analphabétisme écologique et, parallèlement, des niveaux élevés d'aliénation et de solitude. La plupart d'entre nous, et surtout les enfants, ne vivent pas le changement des saisons à travers les transformations des plantes ou des animaux, et ne savent rien de la production de nourriture et de biens. L'analphabétisme est si dangereux qu'il déconnecte complètement l'homme urbain des crises environnementales de la région où il vit, comme le manque d'eau ou la dégradation des sols. Faute de connaissances, l'homme urbain n'est pas incité à adopter un comportement écologique et ne peut faire des choix qui influencent la

communauté et les politiciens. Sans alphabétisation environnementale, la communauté ne peut pas défendre et protéger son territoire. Au contraire, le consumérisme engendre une extraction destructrice et répand l'illusion de l'illimité. La culture doit être revue en termes écologiques, sinon le changement nécessaire ne peut être planifié pacifiquement et à temps. Dans l'ordre mondial politique et économique actuel, il est naïf de croire que les gouvernements agiront dans l'intérêt collectif ou pour la survie de la planète. Le changement doit être encouragé par la base et ne se produira pas sans une culture environnementale adéquate. La distinction entre public et privé s'estompe, masquant l'incapacité de la démocratie actuelle à protéger l'environnement et à réduire les inégalités. Tant que nous ne nous opposerons pas vigoureusement au système dictatorial des entreprises privées modernes, nous ne pourrons qu'aggraver la sécurité sociale et environnementale. Pour changer les mauvaises habitudes par le bas, il faut cultiver l'éducation environnementale, la diversité, les réseaux sociaux, l'altruisme et la résilience.

Le processus de fourniture d'avantages sociaux et écologiques nécessite davantage d'éco-éducation.⁹⁸⁸ Une nouvelle prise de conscience des problèmes écologiques doit être développée et l'éducation à cet égard est cruciale. La création de partenariats et l'accroissement de la transparence, comme la divulgation obligatoire d'informations sur les incidences environnementales de ce que nous achetons, sont tout aussi importants. La communauté pourrait se défendre contre l'énorme pouvoir des grandes entreprises en collectant et en diffusant des informations sur Internet, par exemple sur les garanties de durabilité des différents opérateurs. Cette forme de sélection des plus prévoyants et des plus sensibles à l'environnement pourrait constituer une incitation majeure. Différents aspects de la qualité du travail des producteurs et des vendeurs pourraient être évalués, non seulement les aspects écologiques mais aussi ceux relatifs aux garanties sur les conditions des travailleurs. L'heure est venue d'une mobilisation pacifique, civile mais déterminée pour protéger les générations futures. Les entreprises doivent rendre publics les coûts cachés et les externalités de leurs activités. L'État devrait également agir de manière plus transparente, par exemple en publiant les subventions directes et indirectes accordées aux activités. L'État doit assurer une meilleure gestion des ressources publiques en favorisant les plus vertueux écologiquement. Cela ne s'est pas produit dans l'agriculture, tout comme cela ne s'est pas produit dans la production d'agrocarburants.⁷⁴¹ L'État devrait s'efforcer d'établir un dialogue, une communication publique sur la manière de résoudre les problèmes. Ces objectifs pourraient également être atteints en apportant des changements appropriés à l'éducation et à la formation dans les cathédrales de l'éducation telles que les écoles et les universités. Favoriser le dialogue et le débat, y compris au niveau local, est une étape fondamentale : tout le monde doit être impliqué. Les interconnexions entre la qualité de vie, le bien-être et les services écosystémiques fournis gratuitement par la nature doivent être clairement établies. L'éco-éducation pourrait favoriser la maîtrise du territoire par les citoyens et prévenir les gaspillages et les choix erronés, tels que la privatisation de la nature et de ses services (par exemple, la gestion de l'eau). Un projet visant à améliorer l'éducation écologique doit également porter sur l'éducation alimentaire. Par nos choix alimentaires, nous contribuons à préserver notre santé et celle de la planète.

L'éco-éducation pourrait encourager une adoption plus large des pratiques durables, contribuer à rendre visible l'invisible et prévenir les conséquences involontaires. Il est impératif de se reconnecter avec la nature et, pour ce faire, nous devons comprendre comment la nature soutient nos vies.

L'agriculture industrielle et le capitalisme ont engendré plusieurs crises : une planète qui agonise, des citoyens malades et des agriculteurs étouffés. La diffusion des connaissances nécessaires à la culture, parmi les citoyens et dans les écoles, peut être d'une aide considérable et certainement tournée vers l'avenir. Grâce aux jardins urbains et aux projets dans lesquels l'agriculture entre dans les écoles, il est possible de transmettre un contenu éducatif avec des réflexions intéressantes et tournées vers l'avenir sur la qualité de vie et l'autosuffisance.

L'éducation à l'environnement, selon ce point de vue, est une condition préalable à la conception d'un ordre économique et social durable et est nécessaire pour assurer une sécurité et une souveraineté alimentaires plus démocratiques. D'autre part, il existe un paradoxe évident : la consommation irréversible des ressources de la planète, la pollution, le changement climatique et la réduction de la biodiversité sont générés par la fraction la plus éduquée et scolarisée de la planète, qui constitue moins de 20% des habitants.

La science, ou plus précisément la petite fraction de l'humanité composée de milliers de savants et de chercheurs, propose des prédictions basées sur des chiffres et des démonstrations, qu'aucun *lobby*, aucune multinationale ou classe politique ne peut réfuter par des méthodes objectives et démocratiques. Pourtant, ces prédictions qui devraient nous effrayer ne sont pas utilisées pour changer la façon dont la société est gérée, pas même par la fraction la plus éduquée de l'humanité. Comment pourrions-nous convaincre la plus petite fraction des habitants de la planète, mais aussi la plus instruite, que laisser les combustibles fossiles dans le sol est peut-être la chose la plus utile que nous puissions espérer faire pour les générations futures ? Même si nous parvenions à éteindre tous les moteurs, le climat continuerait à changer, à se réchauffer, car la force d'inertie du système est telle qu'il faudra beaucoup de temps avant que le climat ne trouve un autre équilibre. Soyons honnêtes, personne ne veut entendre parler d'arrêter les moteurs pour arrêter les émissions. L'intelligence et la rationalité ne nous aident pas à sauver l'environnement, et l'innovation technologique accélère le processus d'exploitation efficace et non durable des ressources naturelles. Les informations scientifiques dont nous disposons suggèrent que nous ne faisons pas mieux que les sociétés et les cultures qui se sont détruites avant nous et qui continuent de le faire aujourd'hui de manière sanglante dans de nombreuses régions de la planète.

Nous avons le choix d'empêcher ou de ralentir la catastrophe annoncée, ou de nous laisser submerger par les événements, qui s'annoncent très négatifs : pauvreté, inégalités, diminution de la liberté individuelle, baisse de la qualité de vie, mais aussi de l'espérance de vie. Aujourd'hui déjà, la réalité est très cruelle pour de nombreuses communautés, car elle est ravagée par les guerres et la famine. Les prévisions scientifiques actuelles nous avertissent que nous nous dirigeons dangereusement vers une falaise écologique et une insécurité sociale accrue.

Certaines prédictions sur une éventuelle vie post-apocalyptique sont très sombres, car elle pourrait devenir plus solitaire, pauvre et brutale, c'est-à-dire régie par des instincts qui ne sont plus contenus par l'éthique et la morale. L'éthique impitoyable du profit, dictée par un capitalisme sans règles, sera supplantée par les règles primitives et effrayantes de la survie. L'erreur humaine, dans cette vision pessimiste, bien que facilement prévisible et peut-être encore évitable, est acceptée et devient donc inévitable. Mais malheureusement, nous ne pouvons pas nous faire d'illusions, nous devons nous en sortir en faisant participer activement tout le monde. La première étape devrait être de s'opposer aux lois économiques et financières qui, en fait, nous obligent à rester ignorants et à endommager l'environnement, même lorsque cela ne sert pas à améliorer la qualité de vie : nous sommes soumis à un consumérisme et à un capitalisme aveugles et disproportionnés. Nous devons diffuser davantage d'écologie dans l'éducation et dans l'économie, avant qu'il ne soit trop tard.

Nous pouvons dire que "*nous sommes notre cerveau*" et que des conglomérats de cellules écrivent des livres qui seront lus par d'autres conglomérats de cellules.⁸⁹⁰ La révolution industrielle, qui, au cours des 150 dernières années, a permis à au moins 98% de la population américaine (mais aussi à la majorité des Italiens) de ne plus effectuer de travaux agricoles pénibles, est une réussite à bien des égards. En quelques années, la société et les modes de vie ont été bouleversés. L'espèce humaine n'a jamais connu de changement aussi rapide. Cependant, un obstacle majeur au changement est constitué par les contraintes structurelles, issues de la biochimie et de la physiologie, qui sont les mêmes qu'il y a 200.000 ans : l'adaptation génétique, culturelle et sociale est beaucoup plus lente que le rythme de l'innovation technologique. Le

cerveau est le même que celui de nos ancêtres primitifs, il n'est donc pas préparé aux changements auto-induits. Le cerveau s'est spécialisé dans le traitement et la résolution des problèmes à court terme, car l'avenir est de toute façon incertain, et si l'on va un peu plus loin, il n'existe pas, sauf dans les gènes et la culture transmis aux enfants. De plus, le cerveau est mieux prédisposé à rechercher des récompenses à court terme, plutôt qu'à long terme. Ces aspects signifient que le cerveau a probablement tendance à dévaloriser l'avenir. Les engagements qui produisent des effets à long terme sont souvent sous-estimés. Notre cerveau sera-t-il capable de faire en sorte que nous ne continuions pas à brûler et à manger l'avenir de nos descendants ?

Un ordinateur portable a une puissance de calcul supérieure à celle des ordinateurs les plus puissants qui existaient il y a quelques années. Le progrès technologique n'a pas été suivi d'une adaptation physique, comportementale et sociale. Considérez, par exemple, les guerres et les investissements nécessaires. La guerre, la pauvreté et l'inégalité sont une manifestation de l'inachèvement du processus d'évolution de l'humanité.

Paradoxalement, notre système culturel ne tient pas compte du coût de la pollution des sols et des rivières, mais valorise les activités de dépollution (purification de l'eau, récupération) et le traitement des maladies qui en résultent. Ainsi, la pollution et les maladies augmentent, positivement, certains indicateurs économiques : une folie collective, apparemment imparable. La consommation de terres fertiles et l'utilisation non durable de l'eau ne sont pas non plus comptabilisées, tandis que les actions nécessaires pour fournir artificiellement de la fertilité (par exemple, la fertilisation) et pour amener l'eau là où elle est nécessaire (par exemple, en construisant des barrages et des réseaux de distribution) augmentent les indicateurs économiques de richesse d'un État (comme le PIB).

Malheureusement, la richesse et la pauvreté dépendent l'une de l'autre, la première ne pouvant exister sans la seconde. La connaissance que permet l'intelligence ne peut que nous rendre pessimistes, mais avec la volonté de faire, nous pouvons essayer de trouver la force de changer. Le destin des peuples est étroitement lié à l'environnement et nous espérons que la nécessité, mère des inventions, générera la force nécessaire à l'amélioration. La philosophie de vie "*fais ce que tu veux aujourd'hui parce que tu ne sais pas si tu seras là demain*" a ses avantages mais aussi de nombreuses limites, notamment pour les générations futures. Nos cerveaux sont naturellement bien "équipés" pour faire face aux menaces imminentes, mais ils trébuchent lorsqu'il s'agit de prévenir les problèmes qui affectent l'avenir et la communauté. Continuer à appliquer uniquement des stratégies à court terme est une imprudence que nous ne devrions pas permettre, notamment parce que nous continuerons à construire une société totalement inefficace et non autosuffisante. L'incapacité à prendre rapidement des décisions importantes, pour la protection de l'environnement et des intérêts collectifs, et à réussir à faire des choix politiques qui ne soient pas asservis aux intérêts de quelques-uns, constitue peut-être l'un des points faibles du système actuel.

Une autre limite majeure de l'espèce humaine est son avidité de pouvoir et de richesse, telle qu'aucune autre espèce n'en a jamais connue. Même la certitude de la catastrophe à venir ne peut freiner l'appât du gain.

La société est aveugle : elle s'obstine à ne pas modifier sa relation avec l'environnement, qui est devenue autodestructrice et non durable. Les comportements égoïstes (gènes) prévalent. Apparemment, les êtres humains ont l'air très différents, mais nous avons la plupart des mêmes gènes. Ces gènes servent principalement à construire et à guider un orchestre, composé de millions de protéines. Il faut espérer que les gènes "moins égoïstes" et plus utiles à notre survie sont déjà là et qu'ils s'exprimeront dès que possible. Si nous devons attendre que le cours de l'évolution les favorise, nous n'aurons aucune chance.

Tout ce que nous avons pu faire, nous le devons à des milliards de neurones (divisés en de nombreux types de cellules différentes), qui forment des trillions de connexions (synaptiques) entre eux. Ces cellules cérébrales consomment aussi peu qu'une ampoule de 15 W pour

fonctionner, car elles sont traversées par des potentiels d'action se déplaçant à des vitesses comprises entre 1 et 100 m/sec.⁸⁹¹ Au cours de la vie d'un adulte, un nombre important de nouvelles cellules nerveuses ne sont pas ajoutées et, par conséquent, l'apprentissage génère et renforce de nouvelles connexions. Les connexions entre les neurones constituent les unités élémentaires de la mémoire. La mémoire à long terme peut être consolidée par des changements anatomiques qui nécessitent la synthèse de nouvelles protéines et la formation de nouvelles connexions. Ces modifications structurelles du cerveau se produisent plus facilement chez les jeunes que chez les adultes. Pour cette raison également, le changement culturel doit nécessairement impliquer les jeunes.

Comprendre un organe aussi complexe, avec un réseau de connexions d'une centaine de milliers de kilomètres, est difficile. Cependant, toute action humaine pourrait être réduite à un certain nombre de neurotransmetteurs qui se déplacent et à un faible courant électrique qui est généré et circule dans des réseaux constitués de cellules nerveuses. Le capitalisme et les règles financières qui régissent la société sont dérivés de faibles courants électriques générés dans notre cerveau, régulés par des gènes qui, au cours de millions d'années, ont été sélectionnés pour récompenser les comportements égoïstes. Peut-être qu'une démocratie différente de l'actuelle, avec moins de corruption et plus d'environnementalisme, peut tenter de juguler cette limite structurelle : le système nerveux humain. Même les règles morales, qui visent à promouvoir l'entraide en imposant des contraintes aux individus, sont le résultat d'interactions entre neurones et de mouvements de neurotransmetteurs. Peut-être qu'un jour, nous serons en mesure d'améliorer les zones du cerveau dédiées à l'altruisme en stimulant des gènes spécifiques.

Les découvertes scientifiques permettent de plus en plus de simplifier chaque action humaine individuelle en la ramenant à une combinaison très complexe de neurones et de molécules chimiques, coordonnée par un ensemble d'informations dans l'ADN (les gènes). La méthode scientifique permet de donner de nombreuses explications mais, en même temps, elle assèche la façon dont nous nous percevons. Les possibilités de choix, inhérentes au libre arbitre, sont en fait de plus en plus évidentes, qu'elles sont limitées par des règles physiologiques et des stimuli environnementaux. La nature humaine, comme celle des autres êtres vivants, doit se soumettre à des limites structurelles que nous sous-estimons peut-être, et qui sont la cause de nos comportements que nous classons arbitrairement comme utiles ou désavantageux pour nous-mêmes. Le processus évolutif qui a conduit à la sélection d'un cerveau aussi complexe pourrait être perdant, en raison de la force avec laquelle il était capable de générer des changements dans l'environnement. L'invention de la technologie est une étape très critique : pensons aux armes de destruction massive, à la capacité de modifier le climat de la planète ou à la possibilité de programmer notre destin génétique. Les changements sont si rapides qu'il est difficile de suivre le rythme requis pour les modifications génétiques et les adaptations physiologiques, qui sont probablement nécessaires à la survie même de l'espèce humaine, et donc du cerveau. Le système actuel de régulation sociale prévoit de ne prendre des mesures importantes, telles que celles qui seraient nécessaires aujourd'hui, qu'en cas d'urgence. Mais ce mode de fonctionnement est perdant, car il est activé trop tard. La société n'adoptera probablement une autolimitation sérieuse et utile dans l'utilisation des combustibles fossiles, ou dans la réduction de la biodiversité et de la pollution, que lorsque la catastrophe sera imminente ou déjà évidente : trop tard !

En définitive, même si l'investissement dans une amélioration culturelle des questions environnementales réussit à produire des effets positifs, on ne peut pas attendre la formation d'une nouvelle génération de politiciens et d'entrepreneurs plus informés et sensibles à l'écologie. Malheureusement, il faut agir très rapidement si l'on veut obtenir des résultats concrets. En raison de la catastrophe écologique, la civilisation industrielle pourrait s'effondrer en quelques décennies. Certains diront, à juste titre, que nous ne faisons que passer, et que même si nous essayions, nous ne pourrions pas éteindre toute vie sur la Terre, qui continuera

sans nous. Nous ne disposons pas de la technologie nécessaire pour résoudre des problèmes cyclopéens comme le changement climatique sans en générer davantage.

CONCENTRATION DE L'OFFRE ALIMENTAIRE

Un phénomène qui favorise une répartition inégale du pouvoir et de la richesse est la concentration de l'approvisionnement alimentaire dans un petit nombre de grands distributeurs. Dans certains pays, la grande distribution organisée (GDO) gère plus de 50% du marché : au moins 76% en Allemagne, 70% au Royaume-Uni et 55% en Italie. Un déséquilibre continue d'être généré dans la négociation entre les producteurs et le réseau de vente final, qui est géré par quelques opérateurs. Le système économique a ainsi généré un oligopole. Cet état de fait fait que de nombreux produits alimentaires sont achetés par le réseau commercial à des prix inférieurs aux prix minimums nécessaires pour les produire. Cet écart est partiellement compensé par les aides économiques distribuées à partir de ressources publiques, telles que la politique agricole commune en Europe (PAC). La PAC a été mise en place en 1962 pour soutenir le système agricole : entre 2014 et 2020, plus de 410 milliards d'euros ont été gérés.¹¹⁸⁵ Environ 40% du budget européen (en 2019 : 58,4 milliards sur un total de 161,7 milliards d'euros) est alloué aux aides agricoles.^{987, 1185} Malgré ce soutien destructeur de marché et à forte distorsion, de nombreux groupes d'agriculteurs sont confrontés à des problèmes économiques, comme les propriétaires de moins de 10 hectares, qui représentent 78% des agriculteurs en Europe mais ne gèrent que 23% de la surface agricole utilisée, qui s'élève à 174.613.820 hectares ; 68% de la surface agricole utilisée en Europe est gérée par moins de 7% des agriculteurs qui possèdent des exploitations de plus de 50 hectares (données Eurostat de 2013). Au cours de la période 2021-2027, une poursuite substantielle des aides agricoles est prévue : probablement plus de 1.279 milliards d'euros.¹¹⁸⁵ Il faut espérer que ces ressources seront utilisées pour restaurer et sauvegarder l'environnement, la biodiversité, protéger les sols et lutter contre le changement climatique. Cette aide économique est importante et devrait être fournie en échange de garanties sur l'adoption de pratiques agronomiques durables.

La situation est alarmante pour de nombreuses catégories de produits et de producteurs. Quelques exemples peuvent être mis en avant pour ramener la réflexion à des cas concrets. En Italie, le blé dur est moins cher qu'il y a trente ans et, de plus, il est moins cher que ce que les agriculteurs paient pour le produire. Les agriculteurs sont donc en crise et les consommateurs n'en tirent aucun avantage puisque le prix du pain a augmenté ou est resté le même. Mille kilogrammes de blé dur valent le prix de deux pizzas.⁹⁸⁷ Chose incroyable, le prix de certains types de viande (par exemple, la viande de poulet) peut être identique ou inférieur au prix de détail du pain. Il y a donc un problème, les producteurs ne reçoivent pas leur juste part, les prix de vente ne reflètent pas les coûts de production et le système favorise les derniers maillons de la chaîne alimentaire, qui sont ceux qui risquent le moins. Sans parler des coûts cachés et indirects, tels que les coûts environnementaux et sociaux, qui sont habilement dissimulés.

La tendance à la baisse de la qualité de l'information est clairement visible pour quiconque lit attentivement les étiquettes. Les ingrédients ne sont pas indiqués dans le vin, et quelques centaines de fromages ne mentionnent que trois ingrédients : le lait, le sel et la présure. Les entreprises qui commercialisent des produits de confiserie pour le petit-déjeuner s'attachent beaucoup plus à mettre en évidence les ingrédients absents ou présents en faible quantité selon des critères arbitraires et non objectifs (par exemple, les sucres et les graisses), qu'à indiquer les ingrédients utilisés. Il est presque impossible de connaître l'origine de la plupart des aliments ou de leurs ingrédients.

Le raccourcissement de la chaîne entre les producteurs agricoles et les consommateurs présente plusieurs avantages :

- diminue la dépendance à l'égard des pays lointains ;
- répartit plus équitablement les revenus et évite leur concentration sur le réseau commercial qui, entre autres, supporte des coûts et des risques moins élevés que ceux supportés par les producteurs ;
- améliore les possibilités d'interaction entre les entreprises et les clients, ce qui facilite la conception d'itinéraires mutuellement bénéfiques et plus respectueux de la morale (protection du travail des enfants et prévention du travail non déclaré, par exemple) et de l'environnement (le consommateur vit à proximité du producteur) ;
- la population est plus susceptible d'influencer les choix politiques et commerciaux ;
- diminue la probabilité d'établir des monopoles ;
- réduit les incidences du transport et de l'emballage.

La publicité est de plus en plus régie par des principes économiques qui servent les intérêts de quelques grandes entreprises. Le résultat final est une pléthore de messages trompeurs conçus pour augmenter les ventes (c'est-à-dire susciter l'intérêt) plutôt que pour informer les autorités et les consommateurs : l'information des consommateurs sur les incidences environnementales de la production de biens et de services devrait devenir obligatoire.

La logique actuelle est une logique désespérée qui conduit à l'erreur superficielle de laisser croire aux gens que ce qu'ils ne connaissent pas ne peut pas leur nuire. Les secteurs industriel et financier encouragent la stratégie de l'ignorance collective et, pire encore, cultivent une sous-culture de consumérisme aveugle et inconscient. Le système économique investit d'énormes sommes d'argent dans la diffusion d'informations trompeuses et la propagation du doute afin d'augmenter les ventes, quel qu'en soit le coût environnemental et social. Cette logique peut temporairement faire croire aux gens qu'ils peuvent éviter de s'attaquer au problème.

L'ignorance écologique a un coût social énorme qui, curieusement, ne nous préoccupe pas autant qu'il le devrait. Nous devrions considérer l'importance vitale des retombées de la catastrophe écologique actuelle.

ÉTIQUETAGE ET PUBLICITÉ

Une stratégie pour réduire et contrecarrer la réticence des grandes entreprises à protéger l'environnement et la santé consiste à encourager la transparence, dans le but de faire de la bonne réputation un levier. Dans un marché transparent, si les consommateurs ont la possibilité de faire des choix, ils pourraient privilégier les entreprises capables de proposer des aliments et des produits issus d'une gestion durable et attentifs aux questions cruciales, telles que la santé environnementale et la sécurité alimentaire. La participation des consommateurs peut pousser le marché dans une direction durable. Comme l'affirment certains économistes, nous choisissons le type de société dans laquelle nous vivons chaque fois que nous faisons un achat. Dans une certaine mesure, cette affirmation est fondée, même si elle ne tient pas compte du fait que les consommateurs ignorants, mal informés, pauvres ou victimes d'informations trompeuses peuvent être guidés à volonté et soumis aux règles artificielles de l'économie et de la finance. ¹²
569, 752

L'une des stratégies visant à encourager des choix plus durables et à sensibiliser les consommateurs consiste à diffuser des messages sur les incidences environnementales de la production d'aliments et de boissons. La publicité sur l'efficacité environnementale avec laquelle un aliment est produit devrait constituer une valeur ajoutée à cet aliment. Par cette voie, un comportement plus durable pourrait être encouragé ; les entreprises plus sensibles à ces questions pourraient gagner en visibilité et en reconnaissance auprès des consommateurs. Le paradoxe est que le marché fausse tellement les prix qu'il n'y a pas de correspondance entre les

prix et la qualité. On ne peut pas considérer comme acquis qu'une denrée alimentaire plus chère polluera moins, sera plus saine ou n'exploitera pas les travailleurs.

L'écolabel n'est pas très répandu dans le secteur alimentaire et est souvent utilisé pour fournir des messages non mesurables, non objectifs et non comparables. Des informations peu claires et confuses sont communiquées, telles que "naturel", "écologique", "durable", qui sont de plus en plus utilisées de manière libre et non réglementée. Certaines stratégies bien établies, comme l'agriculture biologique, se concentrent sur quelques aspects, certes importants, comme la non-utilisation de pesticides, mais négligent des aspects importants comme la préservation de la biodiversité, la protection des sols, la réduction du recours à l'irrigation et la réduction de la consommation de ressources non renouvelables (énergie fossile, emballages, kilomètres parcourus).

Dans certains secteurs, comme celui des emballages à base de pâte à papier, il existe des stratégies internationales bien établies, comme la gestion durable des forêts.

Une stratégie pour favoriser le changement nécessaire pourrait donc être l'éco-étiquetage, car cette forme de publicité peut favoriser une plus grande transparence et une meilleure communication entre les entreprises et les consommateurs et, en même temps, encourager des choix commerciaux plus tournés vers l'avenir. Une bonne stratégie d'étiquetage écologique devrait : ^{165, 752}

- Faire connaître les aspects supplémentaires, spécifiques et garantis de manière transparente et objective. Les garanties supplémentaires doivent être facilement mesurables et comparables.
- L'application doit être modulaire et spécifique par secteur de production (par exemple, le riz ou l'apiculture) et par aspect environnemental à protéger (par exemple, la biodiversité plutôt que la protection de l'eau).
- Ne pas obliger les coûts de certification (par des tiers), car cela augmente considérablement les coûts et encourage les conditions de conflit d'intérêts, ce qui peut annuler les avantages souhaités. Les méthodes de contrôle adoptées pourraient être l'autocertification et/ou le contrôle par les autorités nationales.
- Pour certains aspects et dans certains contextes, des rapports supplémentaires sur la qualité devraient être obligatoires et réglementés (par exemple, les pesticides dans l'eau potable et les aliments).

Dans le secteur agricole, les exemples d'indicateurs à prendre en compte pour la conception d'un étiquetage environnemental pourraient être les suivants :

- Amélioration de la gestion des risques chimiques liés aux pesticides ou aux engrais (par exemple en préférant les engrais organiques, tels que le compost et le fumier, aux engrais chimiques).
- Stratégies adoptées pour sauvegarder la fertilité des sols : minimiser le travail du sol et le mouvement des sols, maintenir les sols couverts de végétation tout au long de l'année, ne pas utiliser le feu dans les champs agricoles, faire une rotation des différentes variétés et espèces, appliquer un système de culture simultanée de différentes variétés et espèces (interculture ou polyculture).
- Mise en œuvre de mesures de sauvegarde de la biodiversité : non utilisation de plantes génétiquement modifiées, utilisation d'une proportion de terres agricoles (au moins 10%) non cultivées et couvertes d'espèces sauvages (par exemple pour les pollinisateurs, les oiseaux), réduction de l'utilisation de pesticides.
- Réduire l'utilisation des énergies non renouvelables : raccourcir les itinéraires de transport et, en général, réduire la distance entre les producteurs et les consommateurs, réduire l'utilisation de techniques à forte intensité énergétique (par exemple, l'irrigation, le labourage, le creusement, l'utilisation de plastiques).
- Réduire l'utilisation des emballages.

- Réduire les effets sur le climat : augmentation de la matière organique dans le sol (par exemple, en évitant de labourer et en retirant les parties non comestibles de la plante, ce qui augmentera la matière organique dans le sol, en recyclant les déchets organiques).
- Réduire la consommation d'eau.

Ces messages pourraient être accompagnés d'autres indicateurs, tels que le rapport entre l'énergie investie et l'énergie obtenue, les besoins en eau par kilocalorie fournie, la quantité de gaz altérant le climat par kilo de produit (tout au long du processus, y compris le transport, les carburants, l'emballage, les équipements, la chaîne du froid, l'élimination des déchets et les machines utilisées).

Parmi les informations qui doivent être divulguées par la publicité et l'étiquetage des produits alimentaires (et autres), on trouve notamment

- *Empreinte carbone* calculée sur l'ensemble du cycle de vie (par exemple, par kilocalorie et par kilogramme).
- Consommation d'eau (*empreinte hydrique*) calculée sur l'ensemble du cycle de vie.
- La consommation d'énergie (*empreinte énergétique*) calculée sur l'ensemble du cycle de vie. Le type de source d'énergie utilisé pourrait être indiqué : renouvelable et non renouvelable. Le rapport entre l'énergie investie et l'énergie obtenue est un autre indicateur utile. Des études ont montré depuis longtemps qu'aux États-Unis, par exemple, la réfrigération, le transport et le stockage des aliments consomment huit fois plus d'énergie que les aliments eux-mêmes.⁷
- La quantité de déchets produits aux différentes étapes, y compris les étapes finales non gérées par les producteurs de denrées alimentaires. La manière dont les déchets sont gérés.
- La quantité de polluants rejetés dans les différentes matrices : eau, sol et air.
- Consommation de terres.
- Kilomètres parcourus en comptant tous les ingrédients et les emballages.
- Garanties sur la protection des droits des travailleurs et des mères et sur la non-exploitation du travail des enfants.

En théorie, étant donné que la majeure partie du commerce alimentaire en Europe (et ailleurs) est gérée par quelques grandes chaînes de distribution et de vente, il suffirait d'agir sur un nombre relativement restreint d'entrepreneurs pour améliorer l'étiquetage et la qualité de l'information en général.

Dans le cas du miel, il pourrait être intéressant d'avoir des garanties non seulement sur l'origine géographique, mais également :

- sur les espèces pollinisées ;
- sur les kilomètres parcourus et le nombre de voyages ;
- sur la réduction du recours à des pratiques telles que l'alimentation artificielle ;
- sur l'absence de pratiques industrielles telles que l'utilisation de phéromones, de pesticides et d'antibiotiques ;
- sur l'absence de pratiques telles que le blocage de l'essaimage (par exemple en coupant les ailes de la reine des abeilles) ;
- sur l'absence d'utilisation de reines d'abeilles obtenues par biotechnologie (par exemple, à partir d'insémination artificielle).

Une meilleure information et une meilleure publicité peuvent encourager des choix qui récompenseront les produits les plus durables sur le plan environnemental. Dans un marché transparent avec peu d'inégalités, les consommateurs informés, par leurs choix, ont encore une influence considérable.

Un autre aspect qui peut certainement jouer un rôle important pour rendre la production alimentaire plus durable est celui de rapprocher les producteurs des consommateurs. La réduction de la distance entre les systèmes de production et la communauté des consommateurs

(clients/citoyens) peut influencer positivement les choix écologiques et accroître la possibilité d'orienter les entreprises alimentaires vers une production écologiquement durable.

LA MONDIALISATION DE L'INDIFFÉRENCE

Nous avons adopté la religion du marché ultra-libéral et non régulé, où les banques sont les cathédrales, les entreprises sont les adorateurs, les prophètes sont les "experts" financiers, économiques et boursiers, et les martyrs sont la majorité des habitants de la planète et, trop souvent, les travailleurs.⁹⁷⁶ Parmi les sacrifiés figurent les chômeurs, les travailleurs exploités et les pauvres. En matière de pauvreté, il ne faut pas aller trop loin. Parmi les agri-désastres tolérés et souvent ignorés, il y a l'exploitation de centaines de milliers de travailleurs agricoles en dehors de la légalité : il s'agit d'une forme moderne d'esclavage agricole qui, en 2014, en Italie, a concerné au moins 400.000 personnes (il s'agit d'activités précaires, sous-payées, dangereuses, fatigantes et socialement pénalisées).⁹⁸⁵ En Italie, probablement au moins un produit alimentaire sur cinq qui arrive sur nos tables en provenance de l'étranger provient de lieux où les travailleurs ne sont pas protégés (dans le monde, probablement au moins 100 millions d'enfants sont employés dans l'agriculture).⁹⁸⁷ Pour au moins un tiers des produits vendus dans les supermarchés, il n'est pas possible de connaître l'origine des ingrédients et donc de retracer l'éventuelle exploitation des travailleurs.

Une grande partie de la société vit au-dessus de ses moyens. Pour racheter les péchés, il faut payer les dettes avec des intérêts, c'est-à-dire qu'il faut rendre plus que ce que l'on a reçu, en forçant la croissance nécessaire. La publicité est l'une des prières les plus pertinentes, et le consumérisme est l'évangile : les fondements reposent sur la foi dans le profit. Les péchés les plus redoutés sont la réduction de la consommation et des investissements : la réduction du produit intérieur brut. Les règles artificielles qui régulent les marchés, on pourrait dire la loi céleste du marché, sont basées sur la libre concurrence ultralibérale : le plus fort gagne (un principe naturel, au même titre que les lois de la sélection naturelle revues dans une perspective anthropocentrique). Les fêtes sacrées à célébrer sont les soldes de fin de saison ou les fêtes de Noël. Il existe aussi des formes de paradis terrestre : les paradis fiscaux. La logique de la religion financière court, sans se soucier des aspects éthiques ou environnementaux, balayant tout et tous sur son passage : elle ne peut pas ralentir, elle doit au contraire aller de plus en plus vite. La souffrance et l'injustice qui touchent la plupart des gens sont transformées en richesse, l'obsession de notre civilisation, d'un cercle étroit d'entrepreneurs et d'acteurs sans scrupules. La règle de l'égoïsme sans scrupules devient le principe de base de la vie sociale, une sorte de loi de la jungle. La compétition est un sport de luxe car elle nécessite beaucoup plus d'énergie que la collaboration et n'est donc possible qu'en période d'abondance. En période de crise, de pénurie, comme celle que nous vivons actuellement, continuer à croire que la libre concurrence sans règles doit être la règle cardinale, à mettre en œuvre dans des systèmes tels que les systèmes économiques, environnementaux et sociaux, signifie devoir accepter des dangers mortels.

Un tel système déséquilibré devient constamment instable et la crise finit par être permanente. Il s'agit d'une véritable théologie du progrès qui peut être considérée comme une dictature des marchés, dont la main invisible influence la vie de chacun : elle est constamment proposée comme une loi naturelle immuable pour justifier les souffrances qu'une petite fraction de l'humanité inflige à la majorité. L'empoisonnement de l'eau, la pollution de l'air, la dégradation des sols et l'écocide systématique des non-humains deviennent des effets secondaires considérés comme inévitables et auxquels il faut rester indifférent. Sans parler des victimes humaines telles que les chômeurs, les migrants climatiques et les personnes vivant en dessous d'un seuil de dignité universellement acceptable. La nature devient une marchandise qui peut être privatisée, échangée, dégradée sans autres limites que celles des règles financières.

L'agriculture a été transformée en une industrie de guerre où les machines agricoles (tracteurs) sont les moyens d'attaque, les pesticides sont les gaz neurotoxiques, les engrais chimiques sont les explosifs, les organismes génétiquement modifiés sont les armes biotechnologiques non conventionnelles, les industries chimiques sont les lieux où résident les hauts fonctionnaires (où les décisions sont prises), les industries semencières appliquent une nouvelle stratégie de colonialisme et d'esclavage (elles dépossèdent les gens de leur souveraineté alimentaire) et les agriculteurs sont les soldats (dans de nombreux cas, des mercenaires ou des esclaves). Il s'agit d'un crime sans précédent contre l'humanité et la biosphère. La subjugation, l'indifférence et le silence sont omniprésents, alors que la dégradation est si évidente. Les symptômes d'une grave maladie planétaire sont très évidents, tout comme la mondialisation de l'indifférence.

Les gens ne veulent pas se rendre compte que, malheureusement, nous vivons dans un espace limité et que l'humanité doit donc accepter des limites. Nous sommes probablement la dernière génération à pouvoir choisir de construire une société durable avant l'apocalypse : il est de notre devoir d'éviter de tomber dans le tunnel sans issue de la barbarie, du chaos social. Trop de personnes sont convaincues qu'il s'agit d'un conflit générationnel insoluble ; nous devons au contraire imaginer une nouvelle vision du monde avec plus de sagesse, de prévoyance, de solidarité, d'altruisme et d'équité. La société est à la dérive, sous l'emprise d'un matérialisme autodestructeur régi par l'inacceptable et fausse religion de la croissance économique infinie. Si la machine du consumérisme, du capitalisme, n'est pas arrêtée, le cauchemar du déclin se réalisera inexorablement. En exagérant, nous devons nous demander si nous voulons changer ou disparaître, même s'il est peu probable que même le pire effondrement écologique généré par l'homme au cours de ce siècle entraîne notre disparition complète de la planète ; cependant, nous devons réfléchir et agir avant qu'il ne soit trop tard : ⁹⁷⁷

- Probablement sur des centaines de milliers d'années - certaines découvertes scientifiques suggèrent des millions d'années - la température moyenne de la Planète n'a jamais dépassé $\pm 2^{\circ}\text{C}$. Depuis le début de l'ère industrielle (1850), la température moyenne de la planète a augmenté de plus de $+1,1^{\circ}\text{C}$, et au cours des prochaines décennies, on s'attend à ce que des changements soient générés qui, dans les prévisions réalistes les plus pessimistes, pourraient porter l'augmentation de la température moyenne à plus de $+4^{\circ}\text{C}$ (IPPC), avant la fin du siècle (dans les trente prochaines années, nous pourrions extraire plus de la moitié du pétrole utilisé depuis 1850 : depuis 1970, la consommation mondiale d'énergie primaire a été multipliée par plus de 2,5).
- Les phénomènes météorologiques extrêmes sont en augmentation : rien qu'aux États-Unis, les coûts générés par le changement climatique (cyclones, sécheresses, coups de chaleur, inondations, incendies, tempêtes et ouragans) ont été multipliés par plus de 66 entre 1980 et 2017 ; au niveau mondial, les coûts ont été multipliés par au moins 7. Au niveau planétaire, si la température augmente de plus de $+1,5^{\circ}\text{C}$ par rapport à la moyenne préindustrielle, ces coûts pourraient encore être multipliés par 15 ; si elle dépasse $+3,7^{\circ}\text{C}$, ces coûts pourraient être multipliés par 150. Il s'agit d'estimations qui ne tiennent pas compte d'un probable effet domino qui aggraverait encore la situation.
- Au cours des dix dernières années, des événements climatiques négatifs se sont produits au niveau mondial, qui n'avaient jamais été enregistrés depuis des millions d'années : fonte des glaciers, fréquence et étendue des incendies, déforestation et extinctions massives, dégradation des sols, désertification et acidification des océans.
- Les énergies renouvelables ne pourront pas permettre les niveaux de consommation permis aujourd'hui par l'extraction des énergies fossiles : même les énergies renouvelables nécessitent des ressources non renouvelables, comme le pétrole et les terres rares. Par conséquent, la seule façon d'avancer est de concevoir une société qui consomme beaucoup moins de ressources et qui assure une qualité de vie décente pour tous.

- Les estimations du nombre d'habitants de la planète qui se retrouveront bientôt dans des lieux qui deviendront inhabitables sont stupéfiantes : même plus de 1,4 milliard en moins de 30 ans (dans le scénario le plus catastrophique, une augmentation de la température moyenne de plus de +3,7°C, par rapport à l'ère préindustrielle, pourrait signifier que 75% de la population mondiale se retrouvera dans des lieux qui sont, au moins pendant certains mois de l'année, inhospitaliers). Malheureusement, la migration est souvent une issue que peu peuvent se permettre et, en général, un écosystème aux ressources limitées et en voie d'effondrement ne peut y résister à cette échelle.

Le phénomène de l'accélération alarmante du déclin de la biodiversité ne peut plus être ignoré, et il ne s'agit pas d'une expérience dont la solution se limite aux cercles scientifiques : il doit être abordé par des choix sociaux et politiques forts et courageux. De nouvelles connaissances ne sont pas nécessaires pour comprendre le déclin évident de la biodiversité, et les mesures à prendre dépendent de choix collectifs et politiques. De nouvelles technologies ne sont pas non plus nécessaires pour sauver la biodiversité. Nous perpétons un crime écologique avec un désintérêt général alarmant. Nous devons changer d'attitude et essayer de nous remettre en harmonie avec la nature.

Certains seuils de sécurité dans lesquels nous devrions nous situer pour espérer un avenir prévisible et meilleur ont été amplement exposés plus haut, mais il est utile d'en mentionner au moins deux : le retour à une concentration de dioxyde de carbone dans l'atmosphère inférieure à 350 ppm (au moment de la rédaction de ce livre, la concentration de 414 ppm a été dépassée) et la réduction de la destruction de la biodiversité à moins de 10 espèces par million d'espèces et par an (c'est-à-dire cent à mille fois moins que le taux d'extinction actuel).

Comment pouvons-nous espérer garantir des droits fondamentaux tels que l'air, l'eau, la nourriture, la santé, si nous ne reconnaissons pas le droit fondamental de la nature à exister ? Même si nous limitons notre vision à celle, très égoïste, de l'anthropocentrisme, nous constatons que la nature fournit des services écosystémiques indispensables, y compris à l'économie. La protection de la biosphère, vulnérable et fragile, est une condition sine qua non pour espérer continuer à vivre dans un système démocratique et éviter la barbarisation. Une transition écologique rapide et largement planifiée est nécessaire. Si nous ne la mettons pas en œuvre, nous nous retrouverons bientôt submergés par des catastrophes et une véritable révolution qui n'a rien de rassurant.

La logique qui consiste à détruire les ressources naturelles pour créer de la valeur est perdante. Malheureusement, la société ne semble pas comprendre l'urgence du changement nécessaire. Comme nous l'avons soutenu dans les pages de ce document, pour faire face à ce déclin prévisible, nous devons planifier une résilience collective basée sur la solidarité, sur l'aide mutuelle, qui ne peut être conçue de manière réaliste que par la collaboration et la reconnaissance des limites planétaires. La réduction volontaire des flux d'énergie et de ressources est la seule issue possible. Cette planification, partagée et gérée collectivement, est le parcours le plus rassurant et le moins angoissant que l'on puisse imaginer.

ARRÊTER LE TOURBILLON DE L'INESSENTIEL

La rédaction de ce livre a profité de l'isolement obligatoire provoqué par la pandémie de coronavirus. De nombreuses activités quotidiennes effectuées dans la période pré-coronavirus ont été arrêtées. L'isolement, la réduction des engagements professionnels et l'impossibilité de faire la plupart des activités pratiquées avant la pandémie ont soudainement généré beaucoup de temps libre à passer à la maison. Sans cette aide (non désirée), la publication de ce livre aurait probablement été plus difficile.

Pour combattre la propagation du virus, des mesures radicales ont été prises, qui ont réduit de manière drastique la liberté. Des décisions ont dû être prises sur les choses à ne pas produire ou à ne pas faire afin de réduire le nombre de malades et de morts. Diverses activités non essentielles ont été quasiment arrêtées, comme l'industrie automobile ou le tourisme. En conséquence, la consommation de combustibles fossiles a également diminué. La rhétorique de la guerre a imprégné toute l'histoire des pandémies, et pourtant le changement climatique ou la destruction de la biodiversité représentent des dangers bien plus importants pour l'humanité que le Covid-19. Le réchauffement planétaire, s'il n'est pas arrêté, détruira les fondements de la vie humaine et de celle de nombreuses autres espèces : le Covid-19 ne peut rien faire de tel. L'effondrement du climat et la destruction de la nature ne guériront personne. Malheureusement, la perception du danger généré par le changement climatique ou la destruction irréversible de la biodiversité n'est pas de nature à promouvoir une action encore plus indésirable et impopulaire que celle entreprise pour ralentir la pandémie. Pourtant, la crise environnementale est bien plus grave et peut, entre autres, favoriser des épidémies pires que le Covid-19 (la surpopulation augmente le risque de saut d'espèces, tout comme la surchauffe favorise la propagation de certaines zoonoses).^{1276, 1278} Prévenir l'effondrement de l'environnement permettra de sauver beaucoup plus de vies, mais il est inconcevable que l'application de mesures désagréables telles que le confinement permette de sauver le climat et les générations futures.

Des actions fortes sont nécessaires, telles que la réduction des émissions, qui a été constamment déviée, reportée et reformulée de mille façons dans l'intention de ne rien obtenir de vraiment nécessaire. Pourquoi ne pas réduire de 50% en un mois les émissions de gaz qui altèrent le climat ou imposer des sanctions sévères, pouvant aller jusqu'à la prison à vie, à ceux qui détruisent les forêts primaires ou mangent des animaux sauvages ? En réalité, nous n'avons pas réussi à maintenir des objectifs de réduction des gaz à effet de serre de 5 ou 10% par an, parce qu'ils sont considérés comme des extrêmes inacceptables, alors que, de toute façon, ils ne sont pas suffisants pour résoudre la crise climatique. Les échecs dans les domaines de la prévention du changement climatique et du déclin des services essentiels fournis par la nature sont innombrables. La déforestation continue au lieu de la reforestation, la chasse et la pêche ne peuvent être limitées (le paradoxe est que des pseudo-médicaments fabriqués à partir de cornes de rhinocéros et d'autres animaux sauvages rares sont vendus dans l'intention de guérir le coronavirus), les sols continuent de perdre leur fertilité, la pollution plastique est dévastatrice, l'acidification des océans détruit la vie marine, et pendant l'écriture de ces lignes, un autre signal négatif arrive : la vitesse du changement négatif est plus grande que la vitesse d'écriture et de publication. En juin 2021, les propositions visant à interdire les pesticides et à renforcer les mesures de réduction des émissions de gaz altérant le climat, soumises au vote par référendum, ont été rejetées en Suisse. Cette tentative de réduire le changement climatique a également échoué et l'agriculture chimique a gagné : sur cinq millions quatre cent quatre-vingt-dix mille électeurs, 36% ont voté en faveur de l'agriculture chimique et ont gagné ; 60,68% étaient en faveur de l'utilisation des pesticides et contre la limitation des subventions gouvernementales aux exploitations qui n'utilisent pas de pesticides.¹²⁷⁷ Il s'agit d'une défaite inquiétante, d'une autre grande occasion manquée : les signaux d'alarme ont été tirés mais n'ont pas été entendus.

Lorsque le capitalisme rencontre la nature, il ne s'arrête pas pour l'admirer, mais la capture, la met en cage, la démolit, la privatise et la jette sur le marché : en 1700, 95% des terres du monde étaient encore à l'état sauvage ; en 2000, la proportion est inversée. Le principe moteur de la vision capitaliste est que si l'on arrête de détruire la nature, la multiplication du capital s'arrête, où la multiplication du capital à l'infini est comprise à tort comme indispensable. Au lieu de cela, nous devrions avoir la force d'arrêter le capitalisme très rapidement, plus vite que l'application des mesures anti-Covid (par exemple, la consommation de combustibles fossiles, la déforestation et l'agriculture chimique, la privatisation du capital naturel comme l'eau potable ; au lieu de cela, les paradis fiscaux restent intouchables et les inégalités augmentent).

Nous devons également avoir le courage d'arrêter toutes les activités non essentielles : c'est la seule issue. Pour espérer sauver de nombreuses vies et les générations futures, il est nécessaire de renoncer à quelque chose.

Les grandes crises économiques, environnementales et sanitaires actuelles sont la conséquence de la surproduction, de la surhumulation et de la finance. Il s'agit d'une contradiction du capitalisme qui n'a pas été suffisamment prise en compte, puisque la surexploitation de la nature entraîne l'autodestruction, même si les capitalistes espèrent être les derniers à mourir en voyant la vie des travailleurs lentement détruite. Le fait qu'une planète en ruine ne génère pas de richesse monétaire et que toute forme de société humaine complexe et organisée devient impossible n'est pas suffisamment pris en compte. Les menaces pour la santé, voire la survie de la population, doivent être empêchées, on ne peut donc pas laisser les gens libres de faire ce qu'ils veulent. Des restrictions doivent être adoptées de toute urgence et rapidement, comme ce fut le cas avec la réglementation anti-covidien, qui prévoyait même de suivre les déplacements de tous les citoyens.

Il est urgent de concevoir et de mettre en œuvre un plan d'urgence pour faire face à la crise environnementale et à la destruction des services écosystémiques dont nous dépendons. De nombreuses crises, telles que la crise climatique et le déclin de la biodiversité, s'aggravent et risquent de déclencher une détérioration auto-entretenu : une fois les +3°C atteints, on glissera encore plus vite vers les +5°C ; le déclin de la biodiversité s'auto-entretient jusqu'à l'anéantissement. Nous favorisons les conditions d'une progression de la vulnérabilité, qu'il s'agisse d'une vulnérabilité déterminée par la société ou d'une vulnérabilité causée par l'effondrement des services écosystémiques, c'est-à-dire résultant de la destruction de la nature. Les conditions créées dans le *Capitalocène* sont de plus en plus propices à l'augmentation de l'insécurité et à l'accélération de l'apparition de catastrophes qui ne peuvent être considérées comme naturelles, car elles sont causées par l'homme. Lorsque les catastrophes écologiques nous submergeront tous, la seule chose qui comptera sera la survie, il n'y aura pas de temps pour la méditation et la réorganisation pacifique de la société : il est urgent de repenser la façon dont nous traitons l'environnement et d'organiser une alternative au capitalisme (anticapitalisme, décroissance programmée et élimination de l'inessentiel). Protéger la nature et ses services revient à défendre l'espèce humaine. En l'état actuel des choses, il semble que les choses nécessaires à cela ne se produiront jamais, faute de mobilisation de masse, alors que la crise environnementale ressemble à une guerre mondiale en ce qu'elle annonce l'arrivée d'une catastrophe : laisserons-nous l'activation de masse se produire après des événements désastreux qui submergeront tout le monde, ou parviendrons-nous à organiser une prévention stratégique de l'effondrement ? Le premier choix engendrera des conséquences pires encore. Une mobilisation collective est donc nécessaire pour assurer une transition d'urgence qui protège la sécurité et les droits sociaux.

IL N'EST PAS TROP TARD : nous sommes les maîtres de notre propre destin

En observant le monde qui nous entoure, il est facile de mesurer le niveau d'altération de la nature, largement justifié par des règles artificielles telles que celles de l'économie, de la finance et du capitalisme. Le consumérisme continue de progresser de manière imparable et la planète devient de moins en moins riche et belle, tandis que ses limites deviennent de plus en plus évidentes. L'humanité avance très vite sur une trajectoire suicidaire. Nous avons laissé le monde être dirigé par des chasseurs d'argent impitoyables et non réglementés. Cette volonté est alimentée par l'égoïsme, la cupidité et l'ignorance des questions de survie.

L'histoire récente de l'humanité est caractérisée par l'enregistrement croissant de signaux d'alarme, tant environnementaux que dans les domaines de la santé et de l'économie, résultant de la commercialisation de produits chimiques (et autres). En même temps, la société n'a pas eu la capacité de réagir et d'intervenir à la suite de ces alertes. Les plus sourds ont été ceux qui possédaient le plus d'informations et de connaissances, c'est-à-dire les responsables de l'introduction de nouveaux produits et technologies tels que les pesticides. Le temps est venu de nourrir l'espoir, même avec des interdictions et des restrictions.

L'histoire de l'homme et des abeilles au cours des 70 dernières années a été caractérisée par une augmentation de la puissance chimique utilisée pour combattre les maladies, dont la plupart sont d'origine humaine. Au lieu de prévenir les problèmes en appliquant le raisonnement et l'intelligence, qu'un lycéen normal possède déjà, nous avons développé des stratégies intellectuelles pour ne pas croire ce que nous savons, surtout lorsque ce que nous savons nous dérange tous et, en particulier, les porteurs de grands intérêts économiques. Nous n'avons pas été capables d'accepter les limites de la biosphère et de les respecter. Nous avons remplacé les lois de la biologie, de la chimie et de la physique, qui ne sont pas nécessairement au service de l'être humain, par les règles du marché et de l'économie qui sont un produit de notre culture consumériste. Le résultat est une catastrophe environnementale prévisible. Il n'est pas surprenant de voir des signaux d'alarme continus, comme ceux de la souffrance du système agricole et des pollinisateurs. Pour satisfaire des intérêts économiques aveugles, plusieurs kilos par hectare de produits chimiques tels que des insecticides, des herbicides et des fongicides ont été distribués partout sur la planète depuis au moins 70 ans. Au fil des années, les molécules commercialisées ont toujours été remplacées par d'autres dont la toxicité est d'un ordre de grandeur supérieur. Par exemple, un gramme d'insecticides néonicotinoïdes, apparus après les années 1990, est capable d'exterminer le même nombre d'insectes que plusieurs kilos du célèbre insecticide (organochloré) DDT, interdit depuis des décennies. Les pesticides tuent les insectes à des concentrations de l'ordre du millionième de gramme et peuvent produire des effets sublétaux (par exemple des dommages au système immunitaire, à la reproduction, à l'orientation et à la mémoire) à des concentrations mille fois inférieures, c'est-à-dire des milliardièmes de gramme : un kilo de matière active par hectare est capable d'exterminer des milliards d'insectes. Si l'insecte meurt et que la molécule reste active, elle retourne dans l'environnement et, en supposant qu'elle soit réabsorbée par la biosphère (par exemple par les plantes de l'année suivante), elle reproduira le même effet même si de nouvelles quantités ont cessé d'être distribuées (elles sont persistantes). Des effets sublétaux et synergiques, dont les mécanismes sont largement inconnus mais dont les conséquences sont clairement négatives, sont générés par des doses encore plus faibles. Il s'ensuit qu'un kilo d'ingrédient actif peut potentiellement nuire à un trillion d'insectes chaque année. Ce calcul théorique est provocateur mais tout à fait réaliste, si l'on considère que dans certaines cultures, plus de 30 kilos de pesticides par hectare et par an sont utilisés depuis des décennies (par exemple, dans les vignobles en Italie, entre 15 et 25 traitements phytosanitaires sont effectués par an, tandis que dans les vergers de pommiers, entre 30 et 40 sont utilisés). Les armes chimiques sont utilisées pour la destruction systématique de l'environnement, et sont même utilisées aujourd'hui avant que l'on sache si les agents pathogènes poseront un réel problème pour la culture (insecticides néonicotinoïdes dans les graines de maïs, de tournesol, de coton et de colza). Il n'est donc pas nécessaire de chercher une réponse à la question : comment les pollinisateurs disparaissent-ils ? Il s'agit d'une hypocrisie entretenue par la vulgarisation pseudo-scientifique, dans laquelle la science est exploitée pour persuader, distraire et inculquer le doute. L'un des produits, fruit des principaux intérêts économiques en jeu (les industries chimiques et semencières), est une maladie au nom ambigu : la *mort subite des abeilles* ou, en anglais, *Colony Collapse Disorder*. Malheureusement, des dizaines de chercheurs du monde entier se sont lancés à la recherche de ces fantômes, un véritable gaspillage de ressources.

Il n'est pas nécessaire d'être très perspicace pour prévoir que l'utilisation systématique et constante de molécules toxiques pour les insectes, qui sont également persistantes, bioactives et bioaccumulatives, perpétuée pendant des décennies, entraînerait la destruction des écosystèmes et de nombreux autres phénomènes négatifs, tels que l'augmentation de certaines maladies chez l'homme. Alors pourquoi s'étonner de la disparition d'insectes et de plantes lorsque nous utilisons les molécules les plus toxiques à notre disposition dans le but de les tuer ? Cette insouciance nous coûtera cher.

Il devrait être très facile de comprendre les causes et de sélectionner rapidement les meilleures solutions pour les abeilles et les humains. Incroyablement, les connaissances gigantesques dont nous disposons sont invariablement interprétées par les autorités sanitaires et les politiciens comme étant incomplètes et insuffisantes pour limiter la liberté d'intérêts économiques égoïstes, en conflit d'intérêts évident.

En conclusion, il faut espérer que les dangers mis en évidence dans ce livre, résumés dans un déluge de mauvaises nouvelles, serviront à inciter les gens à réfléchir davantage et à se poser les bonnes questions avant de décider de poursuivre sur des voies ruineuses. Chacun des centaines d'articles scientifiques résumés dans ce livre représente une petite partie d'un puzzle. Examinés isolément, ils sont moins représentatifs de la réalité qu'une tentative de synthèse telle que celle réalisée dans cette publication. L'image globale fournie par la vue d'ensemble décrit une situation bien plus alarmante et inquiétante qu'il n'y paraît. Cette vue d'ensemble montre que nous disposons déjà de connaissances suffisantes pour justifier au moins l'application du principe de précaution : si nous n'agissons pas, personne d'autre ne le fera à notre place. L'utilisation omniprésente et à grande échelle des pesticides nuit aux abeilles, mais compromet également la capacité des écosystèmes à rendre des services essentiels à la survie de la biosphère. Aucun écosystème n'est épargné. Ainsi, les organismes aquatiques, les micro-organismes du sol et les animaux sauvages sont soumis à des doses létales et sublétales tout au long de leur vie. De nombreux pesticides sont persistants, se bio-accumulent et leurs métabolites peuvent être plus dangereux que leurs molécules de départ (les adjuvants, qui peuvent constituer la plus grande quantité dans les mélanges de pesticides commerciaux, peuvent être plus dangereux que les ingrédients actifs). Par conséquent, même si la production et l'utilisation de ces molécules sont arrêtées, leur présence et leurs effets continueront d'être enregistrés pendant longtemps. Si cette attaque chimique massive contre la biosphère n'est pas réduite, les effets négatifs, y compris sur notre santé, augmenteront de manière alarmante et intolérable.

À la lumière de ce qui est connu et partiellement exposé, nous devrions trouver la force de cesser d'utiliser des pesticides. Sans cela, nous continuerons à mettre en œuvre une sorte de pasteurisation de nos campagnes, c'est-à-dire la destruction de la plupart des formes de vie. Notre indifférence face à cette catastrophe rendra le monde plus inhospitalier et ne pourra pas être régénéré par l'accumulation de richesses monétaires. D'autres changements importants sont également nécessaires, comme le fait de nous rendre plus responsables du changement climatique, qui pourrait s'avérer être une véritable apocalypse. Nous avons le devoir de cultiver l'espoir, même lorsqu'il semble futile, et c'est ce sentiment qui a soutenu l'effort nécessaire pour mener à bien le travail d'assemblage critique et de mise en relation des informations scientifiques dans cette publication.

Nous avons besoin de programmes plus éthiques qui expriment mieux les instincts moraux et de survie, et qui répondent aux préoccupations. Les interactions entre les différents acteurs de la société doivent être améliorées afin qu'ils acceptent les limites écologiques et mettent en œuvre des stratégies qui réduisent les comportements obtusément égoïstes et non durables.

Toutes les connaissances scientifiques sont incomplètes et sont susceptibles d'être modifiées, changées ou déformées par des connaissances ultérieures, mais cela ne doit pas être interprété comme une suggestion superficielle d'ignorer ces connaissances afin de reporter l'action qui est la précaution la plus prévoyante. Nous espérons que l'énergie dépensée pour ce travail servira à

sensibiliser et à impliquer les gens, car l'information est nécessaire pour que personne ne puisse s'exclure en disant "*je n'ai jamais imaginé, je ne savais pas*".

La totalité de ce qui a été résumé est connue depuis des décennies, mais on n'a pas fait assez, la volonté politique et la volonté des grandes entreprises, celles qui comptent le plus, ont fait défaut. Ce que nous savons est suffisant pour pousser à l'action dans un monde responsable, qui n'est pas celui dans lequel nous vivons. L'humanité est mortellement prédisposée à se faire du mal inconsciemment et dispose, entre autres, d'outils technologiques capables de générer des changements dans la biosphère supérieurs à ceux générés, de nos jours, par de nombreuses forces de la nature, telles que celles des éruptions volcaniques les plus récentes. En fin de compte, la population humaine est trop nombreuse et trop efficace dans le parasitage de la planète pour pouvoir espérer survivre en sécurité et en bonne santé encore longtemps. La biosphère est de plus en plus polluée et le climat est de plus en plus entraîné par les activités humaines vers un équilibre peu propice à la vie, à l'exception de quelques espèces qui sauront en tirer parti, comme probablement certains microbes, méduses et champignons. En attendant, nous luttons contre la désinformation, la cupidité et l'égoïsme, guidés par des règles économiques stupides et la croissance insoutenable d'une consommation sans limites.

L'histoire géologique nous enseigne que les extinctions massives, consécutives à des événements désastreux, engagent la biosphère pour des millions d'années de récupération. Nous pouvons mettre en évidence notre fragilité à l'aide de règles simples expliquées dans les cours de survie destinés aux militaires : sans air, nous survivons trois minutes ; dans le froid et sans abri ou vêtement adéquat, nous survivons trois heures ; sans eau, trois jours et sans nourriture, nous passons difficilement la troisième semaine. Cette simple "*règle des trois*" pourrait nous inspirer pour choisir les priorités en matière de protection de la biosphère : air, eau, énergie (nourriture) et biodiversité. Aujourd'hui, nous sommes peut-être en mesure de protéger la plupart des espèces vivantes. Malgré cela, nous continuons à avoir une propension inconsidérée à détruire et à remplacer une grande partie d'entre eux.

Pour couvrir les coûts de la réduction de 50% des émissions de gaz à effet de serre, il suffirait de dépenser une fraction du produit intérieur brut (PIB) mondial, c'est-à-dire moins que ce qui est investi dans les dépenses militaires en temps de paix.^{104, 106} Paradoxalement, la diminution de la disponibilité de ressources naturelles bon marché exacerbe les conflits et augmente les investissements dans les dépenses militaires. Un mauvais investissement, par exemple dans les armes, fait partie de la stratégie ratée consistant à "*courir pour essayer et perdre en dernier*".

Avant l'effondrement écologique, il y aura des difficultés sociales, comme une augmentation de la pauvreté et des guerres civiles. Des services considérés comme indispensables, tels que les soins de santé, deviendront indisponibles. Les événements sociaux négatifs peuvent temporairement détourner l'attention du drame que représente la diminution des ressources naturelles, telles que l'eau non polluée ou les sols fertiles. L'actuelle vision à court terme de la politique est donc perdante, car elle continue de considérer que les investissements visant à réduire les catastrophes environnementales et la pauvreté sont bien moins rentables que la production de biens de consommation et de services inutiles, y compris les armes.

Les effondrements de sociétés survenus dans le passé en raison d'une mauvaise conduite environnementale sont bien connus et ont conduit à un suicide écologique. Parmi les causes de ces "*effondrements*", citons :⁹¹

- la déforestation et la destruction des habitats ;
- une mauvaise gestion des sols, qui a entraîné une perte de fertilité ;
- la mauvaise gestion des ressources en eau ;
- la surchasse ;
- la surpêche ;

- l'introduction de nouvelles espèces (rappelons-nous les catastrophes liées aux lapins en Australie ou les épidémies de variole apportées par les conquérants occidentaux au Nouveau Monde) ;
- une croissance démographique supérieure à la disponibilité des ressources ;
- l'augmentation de l'impact écologique de chaque individu.

Aux causes de déstabilisation et d'effondrement s'en ajoutent d'autres, comme le changement climatique, l'épuisement des ressources énergétiques, la pollution et la fin des échanges avec les pays voisins.

La décadence et l'extinction des sociétés passées ont tendance à suivre des chemins similaires, répétant l'occurrence d'événements conséquents : naissance, croissance, maturité, vieillesse et mort d'un peuple. La violence et la guerre étaient la conséquence naturelle des moments de crise.

Aujourd'hui, au moins 170.000 litres de pétrole, 100.000 mètres cubes de gaz et 250 tonnes de charbon sont consommés chaque seconde : combien de temps ce rythme de consommation peut-il se poursuivre, voire s'accélérer ? La course dans le sens d'une augmentation globale de la consommation de ressources finies va générer des dommages irréversibles pour la santé, l'environnement et le climat, avant même que les énergies non renouvelables ne soient épuisées. Nous devons empêcher nos arrière-petits-enfants de se poser la même question que celle qui se pose aujourd'hui lorsque nous pensons aux histoires des sociétés passées qui se sont détruites (les habitants de l'île de Pâques sont exemplaires) : comment cela a-t-il pu se produire ?

Le temps est essentiel, et c'est précisément le temps qui manque dans le monde moderne, pour que nos enfants puissent regarder en arrière et montrer de la gratitude, un sentiment qui sera bon pour leur santé.

L'espoir est qu'à la fin de cette lecture, plus aucun doute ne subsistera ; l'exploration de nouvelles solutions n'est pas un caprice mais une nécessité. La non-durabilité de la société de consommation actuelle s'est condamnée toute seule et nous sommes donc obligés de changer pour aller vers un nouvel avenir. Les innovations les plus importantes de l'humanité semblaient initialement reléguées au monde des rêves. Ce qui semble être une utopie aujourd'hui peut nous surprendre demain si nous sortons de notre immobilisme actuel. Nous n'avons aucune garantie de réussir à éviter les situations négatives en changeant notre mode de vie, mais si nous n'essayons pas, l'échec est garanti.

REMERCIEMENTS

Cette partie du livre est présente uniquement dans la version papier.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES INDIQUÉES DANS LE TEXTE

Cette partie du livre est présente uniquement dans la version papier.

Achévé d'imprimer en juillet 2023

