



# Formation par la recherche

## Mémoire de recherche

Sujet du mémoire : Quels sont les enjeux stratégiques et de gestion de l'introduction du bio-kérosène dans le secteur aéronautique ?

Auteur : Matthieu GOUDINEAU

Responsable du mémoire : Mme Mme Rhita Bouazzaoui

Année de réalisation : 2011

Document Intermédiaire de Recherche 4

Ecole de Management Léonard de Vinci



Avant de dévoiler ce document intermédiaire de recherche numéro trois, j'aimerais adresser mes remerciements au corps professoral qui m'a apporté son aide et a contribué à l'élaboration de ce mémoire ainsi qu'à la réussite de cette année universitaire. Je tiens à remercier sincèrement Monsieur Bruno- Laurent Moschetto, qui, en tant que tuteur de mémoire, s'est toujours montré à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de ce document intermédiaire, ainsi que pour l'aide et le temps qu'il a bien voulu me consacrer. Sans lui ce mémoire n'aurait jamais vu le jour.

# SOMMAIRE

Liste des sigles et abréviations utilisés .....	4
<b>Partie I : Introduction .....</b>	<b>5</b>
A) Constatation du problème : .....	5
B) Justification de ce choix : .....	5
C) Projet Professionnel : .....	6
D) Axes de réflexion : .....	7
<b>Partie II : Synthèse de littérature .....</b>	<b>8</b>
<b>1) La recherche de nouvelles énergies .....</b>	<b>8</b>
A) L'apparition des biocarburants au sein du marché aéronautique : .....	8
ii) L'utilisation des Algues en tant que carburant .....	9
iii) Les perspectives de développement du bio-kérosène: .....	12
B) La confrontation au réel : les biocarburants soumis aux tests : .....	12
i) Airbus .....	12
ii) Continental Airlines .....	13
iii) Air New Zealand, et Japan Airlines .....	14
C) Fonctionnement de ces biocarburants : .....	15
<b>2) L'impact des bio-kérosènes sur le choix des investissements des compagnies aériennes et la gestion financière des aéroports. ....</b>	<b>17</b>
A) L'utilisation du gamma-valérolactone (GVL) .....	18
B) Une solution complémentaire au GVL : L'Ethanol. ....	19
C Les aspects de gestion : .....	22
i) L'utilisation du kérosène vert favorise la création d'emplois: .....	23
ii) Avantages économiques : .....	23
iii) Modèle de gestion aéroportuaire et faisabilité : .....	23
iv) Viabilité économique : .....	25
<b>3) L'utilisation de l'énergie Solaire pour remplacer le Kérosène. ....</b>	<b>26</b>
A) Solar Impulse, le premier Avion solaire .....	26
B) Gestion économique de l'énergie solaire : L'énergie solaire aura du mal à supplanter le pétrole .....	27
<b>III) Hypothèses d'études : .....</b>	<b>28</b>
Plan de bataille méthodologique : .....	29
Démarche de résolution des hypothèses : .....	29
La démarche méthodologique : .....	29
Glossaire : .....	31
Bibliographie : .....	32

## **Liste des sigles et abréviations utilisés**

**ANZ:** Air New Zealand

**EADS:** European Aeronautic Defence and Space

**GTL:** Gas to Liquid

**GVL :** Gamma-Valerolactone (Gaz)

**JAL:** Japan Airlines

**PIB:** Produit Intérieur brut

**TEP:** Tonne Equivalent Pétrole

**UE :** Union Européenne

## **Introduction**

### A) Constatation du problème :

Nous vivons dans un monde globalisé, toujours plus ouvert culturellement, politiquement et économiquement. Il est important aujourd'hui, au 21<sup>ème</sup> siècle, d'apprendre à maîtriser ce monde. En effet, la vie défile de plus en plus vite et les informations échangées sont de plus en plus complexes. Si l'on regarde légèrement en arrière, on remarque qu'à travers les époques le monde a changé à une vitesse folle – modernisation, invention, création d'empires économiques....

L'Homme a su exploiter la planète à son profit afin de réaliser ces changements. Nous sommes passés du bois au charbon, puis du charbon au pétrole. Mais aujourd'hui on se heurte à certains problèmes : le pétrole qui est une énergie fossile est en cours de raréfaction d'une part, et est soumis à des règles draconiennes de stockage d'autre part. De quoi vivrons-nous demain s'il n'y a plus de pétrole (cœur de fonctionnement de l'industrie, mais également de l'économie et de la finance) ?.

La conscience collective a, elle aussi, évolué ; mais cette fois dans une volonté de s'orienter vers l'économie durable. Il y a eu l'apparition du diesel, des premières voitures électriques, puis de la bio essence. Désormais est testée également une nouvelle source d'énergie destinée à l'aviation civile : c'est le bio-kérosène, appelé aussi agro carburant.

Or depuis fin 2007, le secteur de l'aéronautique est en pleine effervescence suite à la découverte de ce type de kérosène qui pollue beaucoup moins. Mais l'apparition d'un nouveau produit sur les marchés entraîne des bouleversements au sein des entreprises, et donc sur l'économie du secteur. Savoir qu'un produit qui supplanterait le pétrole d'ici quelques années a été découvert, risque d'engendrer d'importants impacts sur les marchés financiers, et dans les sociétés liées au domaine de l'énergie.

La question posée à laquelle j'aimerais chercher une réponse est la suivante: « Comment les entreprises du secteur aérien vont-elles organiser leur système de production et d'exploitation afin de mener à bien la transition entre les énergies fossiles et les nouvelles sources d'énergie? ».

### B) Justification de ce choix :

Je suis actuellement dans l'axe Finance parce que j'aime la culture d'entreprise liée aux stratégies financières, et m'intéresse aux façons dont le marché évolue en fonction des innovations. Il faut aussi remarquer que la Finance ne favorise pas toujours le développement durable : par exemple Greenpeace est intervenue contre les investissements dans les sociétés qui gèrent des plateformes off-shore. Avec l'introduction du bio carburant sur le marché aéronautique, le domaine de la finance devra tenir compte des enjeux du développement durable.

De plus, la raréfaction du pétrole est une donnée économique majeure. S'il n'y en a plus, il risque d'y avoir un bouleversement économique profond. Le monde entier se tournera vers de nouvelles sources d'énergie. Le biocarburant, une de ces innovations, permettra de substituer progressivement une nouvelle source d'énergie au pétrole. Aujourd'hui, si l'on prend un petit peu de hauteur, on remarque que l'atmosphère est dégradée, le pétrole est de plus en plus cher, de plus en plus nuisible pour l'environnement et pour l'homme... Les politiques des différents pays en ont pris conscience, et cherchent à sensibiliser les populations au développement durable.

En outre, nous le savons tous, le marché énergétique est un marché à fort potentiel financier. Que ce soit dans le pétrole, l'électricité, l'énergie solaire, les entreprises se multiplient, et des milliards de dollars circulent sur ce marché. Demain il est fort probable que le biocarburant ait lui aussi un grand impact financier.

Enfin, je voudrais insister sur le caractère innovant de cette nouvelle économie. Le fait qu'une essence à base de plantes et d'algues puisse faire voler des avions, aurait paru il y a vingt ans, de la pure science fiction.

Ce mémoire a pour but de contribuer à faire comprendre les enjeux de ces mutations à ceux qui souhaitent s'investir dans le secteur des biocarburants aéronautiques.

### C) Projet Professionnel :

Ayant suivi le cursus du double diplôme franco-italien, en finance – production industrielle, l'industrie aéronautique et automobile principalement sont dans mes centres d'étude et je suis diplômé du Politecnico di Torino. Par ailleurs mon domaine d'activité souhaité est la finance : j'ai effectué mon dernier stage dans le domaine financier de la société Pathé UK, une entreprise cinématographique, et je me destine par ailleurs à poursuivre ma fin d'étude dans l'axe audit – finance de marché. Enfin, l'aéronautique est un domaine qui m'a toujours fait rêver, et qui me tient beaucoup à cœur. Le thème de ce mémoire s'inscrit parfaitement dans mes études suivies, et dans mon projet professionnel : Pourquoi ne pas devenir financier du secteur développement durable dans des sociétés industrielles telles qu'Alitalia, ou Air France ?

J'ai toujours aimé l'industrie, et plus particulièrement les innovations qui affectent le milieu du transport.

#### D) Axes de réflexion :

Je réfléchirai à ce sujet en étudiant dans un premier temps quels sont les nouveaux carburants, de quoi ils sont constitués ? Je porterai mon regard sur leurs utilisations dans le secteur de l'aviation. Je comparerai les différentes sources d'énergies qu'il est possible d'utiliser. J'étudierai bien entendu leurs coûts, mais également leurs avantages ainsi que tous les aspects de gestion afférents à l'utilisation de ces nouveaux carburants...

Nous nous intéresserons dans un second point à leur introduction dans le secteur aérien. Les biocarburants aéronautiques ne sont pas constitués de la même façon que le kérosène. Cette essence doit passer à travers plusieurs laboratoires avant de devenir « bio ». Nous parlerons donc dans cette partie de la gestion des infrastructures auxquelles les aéroports doivent faire face afin d'exploiter le mieux possible et à moindre coût les nouvelles énergies. Je me focaliserai sur les répercussions économiques de l'arrivée du biocarburant dans le secteur aéronautique,

Enfin dans un troisième point j'étudierai l'utilisation d'autres sources d'énergies potentielles telle que l'énergie solaire.

## **Partie II : Synthèse de littérature**

### **1) La recherche de nouvelles énergies**

#### **A) L'apparition des biocarburants au sein du marché aéronautique :**

Le secteur aéronautique a repris le modèle du secteur automobile en ce qui concerne l'utilisation des énergies propres. Une infime partie des combustibles fossiles consommés tous les ans sur la planète - 3 à 4% - le sont dans les avions. Ils sont ainsi responsables de 2% des rejets de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère. Le trafic aérien ne cesse d'augmenter année après année. On estime que le taux de croissance du trafic atteindra environ 7% par an dans les vingt prochaines années, ce qui entraînera une émission de CO<sub>2</sub> d'environ 3% par an. A l'instar du biocarburant routier, les constructeurs aéronautiques ont développé un nouveau concept de combustible : le bio-kérosène<sup>1</sup>.

Semblables à ceux des automobiles, ces nouvelles sources d'énergies possèdent des avantages et des inconvénients. Il existe plusieurs atouts écologiques et énergétiques qui permettent une bonne exploitation des biocombustibles : Ils favorisent le développement durable. Ensuite le rejet de gaz polluant est nettement diminué. Certes il existe toujours, mais à une échelle nettement inférieure à celle des énergies fossiles. Le dioxygène émis est principalement celui contenu dans les végétaux durant leur croissance, grâce au processus de photosynthèse. Mais ce taux reste assez faible. Il existe déjà deux carburants « bio » qui ont déjà été testés, et qui sont un minimum rentables : on peut citer les plantes de Jatropha et les algues de cultures; Le potentiel énergétique des algues est 50 fois plus important que les végétaux utilisés autrement, c'est-à-dire qu'elles vont donner 50 fois plus d'huile que la biomasse<sup>2</sup> utilisée actuellement.

Néanmoins ils présentent quelques aspects négatifs: il faudrait produire plusieurs tonnes de biocarburant chaque année afin de les exploiter au sein de tout le trafic aérien. Mais il n'existe pas encore de sociétés spécialisées dans ce type de production. L'utilisation à grande ampleur est donc pour l'instant non exploitée.

Par ailleurs, au-delà du coût que cette production représenterait, il y a des règles à respecter, notamment au niveau de l'impact sur l'écosystème. Dévaster des forêts ou des pans de cultures

---

<sup>1</sup> Voir Glossaire page 31

<sup>22</sup> Voir glossaire page 31

entières pour acquérir quelques grammes de CO2 d'économie, paraissent des moyens bien lourds. Si un jour les biocarburants doivent remplacer le kérosène, il y aura comme conséquences une culture intensive de la terre afin de produire des sources d'huile végétales. Ces cultures pourraient entraîner des dysfonctionnements au sein de l'écosystème, mais également une pollution due aux engrais et pesticides qui pourraient être employés.

### **i) L'utilisation des Algues en tant que carburant**

Le monde a besoin de ressources durables et de carburant de remplacement, en particulier dans le secteur de l'aéronautique. Chaque année, plus de six cents millions de barils de combustibles à base de pétrole sont raffinés afin de créer du kérosène pour le marché aéronautique. L'objectif aujourd'hui est de s'assurer que l'utilisation d'énergie ne soit plus un obstacle au développement durable.

La recherche des énergies durables est par ailleurs favorisée par la capacité d'innovation des Etats, ce qui leur permet de faire progresser les technologies adéquates sur les marchés.

Aujourd'hui, de nombreuses entreprises se concentrent sur le développement de souches d'algues conçues spécialement pour créer du bio-kérosène destiné au secteur aéronautique.

Ces entreprises arrivent à fournir environ 15 millions de litres de biocarburants par an. Ainsi les constructeurs aéronautiques et les petites entreprises de production de bio kérosène passent régulièrement des accords commerciaux. Par exemple Heliae Development a investi 3 millions de dollars chez Boeing pour permettre de financer la recherche et la commercialisation de biocarburant à base d'algues.

L'université des sciences de l'Arizona a conclu un accord de collaboration avec plusieurs partenaires afin de développer, produire, et vendre aux compagnies aériennes un combustible dérivé des algues.

Un nouveau type de kérosène a été créé grâce à des souches d'algues qui peuvent convertir une grande partie de leurs masses cellulaires en un type d'acides gras. Ces acides forment une huile qui, après désoxygénation, recrée la structure moléculaire du kérosène. C'est ce qu'on appelle le carburant de deuxième génération

Avec cette désoxygénation, il n'y a plus besoin d'avoir recours aux procédés de craquages thermiques<sup>3</sup> qui sont très coûteux. Avec la désoxygénation, on crée des acides gras, à l'aide de graisses animales ou végétales (Algues, biodiversité, plantes...). Cet objectif réalisé est le fruit d'une grande recherche qui ne fait que commencer. Nous sommes au stade où l'on n'arrive à produire du kérosène à un faible coût que si celui-ci est créé à partir de carburant de première génération (pétrole brut).

Dans cette optique, les algues permettent d'apporter un rapport coût-efficacité équilibré, car nous sommes dépendants du monde dans lequel nous vivons aujourd'hui, en ce qui concerne les combustibles fossiles.

Les chercheurs sont ensuite passés du stade de l'expérimentation en laboratoire au stade des tests.

Mais tout le monde ne s'accorde sur l'efficacité de ce système de création de biocarburant. Ainsi le ministre de l'environnement allemand, Karl-Hermann Steinberg jette un doute sur les vertus et les avantages de la conversion de micro-algues en biocarburant. Mr Steinberg teste les bioréacteurs depuis 12 ans en utilisant les micro algues de la variété *Chlorella vulgaris* : *« ce procédé, écrit-il, même en étant encore optimisé, conduirait à un prix de 50 euros par litre de carburant. Les algues ont un rendement de 0,2 g de matière sèche par litre. Vous devez donc filtrer 5.000 litres d'eau pour obtenir 1 kg de matière sèche. Cela demande une dépense énorme, qui nécessite toujours plus d'énergie que ce qui est récolté »*.

Mais il faut ajouter que les recherches sur le *Chlorella Vulgaris* ne sont plus menées aux Etats-Unis depuis longtemps, au profit de l'exploitation d'autres genres d'algues beaucoup plus compétitives et productives. Un grand avenir s'ouvre à toutes les autres variétés de plantes aquatique existantes.

---

<sup>3</sup> Voir glossaire page 31

Savoir utiliser correctement l'énergie est un facteur principal de nos communautés. En effet, grâce à la révolution industrielle, le pétrole a supplanté le charbon, un peu avant 1914. Notre société a été marquée par deux siècles de consommation d'énergies fossiles. Les statistiques montrent que les citoyens américains ont consommé huit tonnes d'équivalent pétrole (TEP) par an, soit deux fois plus que les consommateurs européens à un niveau de vie équivalent ; par ailleurs la consommation des Américains serait cinq fois supérieure à la moyenne mondiale et quatorze fois celle de la population indienne.

Il existe une relation entre le taux de croissance du produit intérieur brut (PIB) et le taux de croissance de la consommation d'énergie. Mais depuis quelques années, on constate une remise en cause de cette relation. Celle-ci n'est plus viable : en effet l'impact sur l'environnement, le développement de nouveaux pays très consommateurs d'énergie, ainsi que la conjoncture économique mènent à une reconsidération de la croissance du PIB.

Cette remise en question est aussi liée au fait que la société humaine traverse depuis 2008 plusieurs grandes crises : la crise financière et économique, la crise de l'énergie, mais aussi la crise climatique...

C'est pourquoi, afin de diminuer les impacts de ces dysfonctionnements économiques, il y a un grand engouement pour la recherche des énergies de substitution. Ces énergies de substitution dites renouvelables ont donc pour vocation d'apporter une solution aux principales crises évoquées.

Le rythme de consommation d'énergie peut varier selon les saisons, ou la météorologie. On prendra donc soin de choisir le moyen de transport adéquat du bio-kérosène pour le maintenir à température constante. On appelle alors ces énergies : bioénergies, ou énergies propres. Néanmoins il n'existe aucune source d'énergie parfaite, exempte de pollution de l'atmosphère, ou de l'eau, ou encore du paysage. Si l'on souhaite obtenir de telles énergies renouvelables, il faut alors recourir à une nouvelle technologie pour les produire. Ces nouvelles technologies permettront en plus d'atteindre les objectifs du projet « le paquet énergie climat », créé à l'initiative du Grenelle de l'environnement d'automne 2007 à Paris, et qui vise la réduction d'ici 2020 d'au moins 20% les émissions de dioxyde de Carbone.

En France, il y a donc une recherche afin de stimuler le développement des éco-industries dans le cadre de ce projet « éco-tech 2012 ».

## **ii) Les perspectives de développement du bio-kérosène:**

Tous les avions de ligne utilisent le kérosène, ou Jet-A1<sup>4</sup>. Ce combustible possède beaucoup d'avantages. Le rapport masse-énergie est excellent, l'incandescence en chambre de combustion est facile et on la maîtrise très bien. Par ailleurs les propriétés du kérosène restent constantes entre -30 et +50°C, ces deux valeurs bornes représentent les températures extrêmes au sein desquelles les avions sont amené à évoluer.

Mais on ne peut pas éviter certaines questions à se poser. La principale concerne les réserves de pétrole. Celui-ci est de plus en plus cher, car beaucoup plus difficile à extraire – Il faut s'attendre à prévoir une augmentation deux fois plus élevée du baril tous les cinq ans environ –. De plus la quantité diminue, et entraînera la mise en place de quotas et/ ou taxes supplémentaires.

## **B) La confrontation au réel : les biocarburants soumis aux tests :**

### *i) Airbus*

Après de nombreuses recherches réalisées par Boeing, Airbus s'est mis dans les mêmes pas. L'A380 a réalisé en début 2008 un vol d'essai d'une durée de trois heures, premier vol d'un avion à quatre réacteurs alimenté partiellement grâce un carburant alternatif au kérosène.

Pour effectuer ce vol, l'un des quatre moteurs Rolls-Royce de l'appareil était alimenté par un carburant de synthèse dérivé du gaz, connu sous le nom de GTL (Gaz to Liquids).

Ce vol marque le début d'une phase d'essais à long terme pour Airbus. Cela permettra à l'entreprise aéronautique de tester le potentiel de ces nouvelles énergies. Elle pourra en outre tirer les avantages apportés par ces carburants de synthèse. On remarque donc un engouement certain des sociétés aéronautiques, afin de trouver un carburant de substitution qui permettra de trouver le kérosène de demain. On possède déjà quelques pistes de réflexion: Le GTL dégage moins de soufre que le kérosène et présente des avantages en termes de consommation de carburant par rapport aux avions actuels.

---

<sup>4</sup> Voir glossaire page 31

## ii) Continental Airlines

Par ailleurs, la compagnie américaine Continental Airlines a effectué un vol entièrement alimenté par du bio-kérosène. Le vol s'est effectué sur un Boeing 737 de Nouvelle Génération équipé de turboréacteurs de type Royce Royce.

Ces batteries de test ont pour but à la fois de valoriser les essais au sol (performances des réacteurs), et en laboratoire (quantité de rejet de matière toxique). Dans l'utilisation des carburants nouvelles générations, il y a un grand nombre de contraintes à respecter en ce qui concerne la sécurité. Ces tests ont donc pour vocation d'assurer la conformité aux très grandes exigences de sécurité et de fonctionnement des carburants dans le domaine de l'aéronautique. Pour ce vol, Continental Airlines a utilisé un Boeing 737. Le biocarburant était composé cette fois d'algues (produit par l'entreprise Sapphire Energy) et de jatropha<sup>5</sup>. L'huile de Jatropha est tirée de graines de Jatropha Curcas, une plante du désert. Cette huile possède une densité de 40% d'huile. Cet arbuste a la grande particularité de pousser sur des sols quasiment dépourvu d'eau, d'où son surnom « d'or vert du désert ».

Pour la première fois, une compagnie a effectué un test qui n'utilise plus comme carburant du kérosène à base de pétrole ! Ceci est une révolution dans le monde aéronautique, qui aura des répercussions dans le monde économique. Si on peut se passer de pétrole pour l'aéronautique, on pourrait également s'en passer pour l'automobile, la chimie, et l'industrie en général, etc.

Selon l'évaluation du rapport Bio-Derived Synthetic Paraffinic Kerosene : le comportement des combustibles testé est le même, voire a des performances supérieures à celui du kérosène Jet-A, le kérosène crée à partir de pétrole conventionnel. Les tests ont été effectués sur plusieurs types de moteurs, et sur différents appareils. On a utilisé des mélanges par demi. C'est-à-dire que les ressources énergétiques de l'avion étaient constitué de 50% de carburant de type Jet-A, et 50% de biocarburants durables.

Les résultats des essais effectués donnent entière satisfaction. Ils dépassent même les contraintes appliquées au kérosène utilisé actuellement par l'aéronautique civile. Les

---

<sup>5</sup> Voir glossaire page 31

contraintes actuelles à respecter sont portées surtout sur le point de cristallisation, ainsi que sur la compacité et la viscosité du carburant.

Par ailleurs les essais ont permis de vérifier que l'utilisation d'un mélange de plusieurs essences (kérosène et biocarburant), n'avait aucun effet négatif sur les moteurs.

Enfin les tests ont démontré également que ces nouveaux carburants ont un contenu énergétique supérieur au kérosène classique, celui issu du pétrole. Cela pourrait permettre de réduire la quantité de carburant consommé par kilomètre parcouru.

### iii) Air New Zealand, et Japan Airlines

Par la suite, de nombreux autres essais ont suivi. Nous pouvons citer l'exemple de tests effectués sur un Boeing 747-400 d'air New Zealand ainsi que sur un appareil 737-800 équipé de turbopropulseurs.

Pour ces essais, la compagnie néo-zélandaise a collaboré avec l'entreprise « Aquaflow Bionomic Corporation » ainsi qu'avec Boeing pour la création d'une essence à base d'algues créées par l'écume des étangs. Ce processus développé par Aquaflow permet de recueillir les algues directement dans les plans d'eau riches en nutriment. Les résultats des tests communiqués par la compagnie néo-zélandaise montrent que le mélange s'est comporté comme prévu lors des tests en laboratoire, puis en vol.

Par ailleurs, des essais ont également été effectués sur un avion de la compagnie japonaise Japan Air Line (JAL) 747-300 équipé de turbo réacteurs Pratt & Whitney. Le combustible utilisé par la compagnie japonaise était composé de biocarburant (80% de lin bâtard (une espèce de cameline) , au moins 16% de jatropha et au moins 1% d'algues de culture). Le résultat a été spectaculaire : parmi les quatre réacteurs, un seul a été alimenté en bio kérosène. Or ce dernier a enregistré exactement les mêmes performances que les trois autres qui ont fonctionné au kérosène habituel (Jet A).

Le résultat de tous ces tests a permis de démontrer la résistance technique des biocarburants à haute altitude.

### **C) Fonctionnement de ces biocarburants :**

Les biocarburants issus de la biomasse représentent un ensemble de solutions, qui sont constitués de plantes agricoles (blé, sucre, maïs...). L'utilisation d'un carburant créé grâce à la biomasse rejette exactement autant de CO<sub>2</sub> que ce que les plantes ont consommé pendant leur période de croissance. Ce principe peut soulever quelques questions d'éthique. Ainsi doit-on transformer des surfaces agricoles destinées à l'alimentation pour la donner aux avions ?

C'est pourquoi la création de biocarburants dits de seconde génération a eu lieu. Ces combustibles sont réalisés en exploitant des plantes non cultivées sur des surfaces agricoles, telles que certaines catégories d'algues, ou de champignons ou encore de déchets végétaux comme nous l'avons déjà vu. Bien sûr la meilleure solution serait de créer une essence fabriquée à l'aide d'une catégorie d'algues très consommatrice de CO<sub>2</sub> mais qui en rejette peu, dans le but non seulement d'absorber ce gaz à effet de serre, mais aussi de limiter les rejets polluants.

Une fois l'eau de des étangs filtrée, il suffit de faire la culture de l'algue. Cette technique a un atout particulier : on a la possibilité d'alimenter les avions à l'aide de plantes mélangées à du kérosène, et en plus il y a peu d'impact écologiques, car la culture de ces plantes s'est effectuée sur des terres non cultivables, sans entraîner de déboisement ni d'impacts sur les réserves en eau.

En revanche, les installations coûtent très cher. Pour réaliser une quantité de culture d'algues suffisante pour alimenter toute la flotte d'une compagnie 365 jours sur 365, il faudrait que les usines de traitement se trouvent au sein même de l'aéroport, et il faudrait y mettre une logistique d'apport, de transformation, de mélange, et d'exploitation de ces algues. Cela risque de prendre plusieurs années, et c'est extrêmement coûteux. Pourtant, c'est ce qu'Air New Zealand (ANZ) a commencé à faire.

Suite aux résultats concluants menés sur le B747, ANZ a augmenté les tests de compatibilité entre le bio-kérosène et les moteurs. En ce qui concerne le 787 Dreamliner de cette compagnie, il faut noter que la structure de l'appareil est constituée en polymère plus léger que les précédents Boeing. Cela lui confère donc un moyen de propulsion moins énergivore. ANZ travaille depuis quelques temps sur un prototype d'avion long courrier à hélice afin d'allier économie de coûts et baisse de son empreinte écologique. En effet, les avions à hélices consomment moins de carburant qu'un avion à réaction, car ils volent à plus basse

altitude, donc leur poids nécessite moins d'énergie pour favoriser leur maintien en l'air. En revanche ils mettent deux fois plus de temps à parcourir un trajet. Nous avons alors d'un côté une baisse des coûts et des impacts écologiques, mais d'un autre côté, on peut se poser la question de savoir si les voyageurs accepteront de mettre deux fois plus temps pour un vol ? Nous développerons ce dernier point dans la partie concernant les hypothèses de travail.

En conclusion, nous pouvons affirmer que, d'après les informations délivrées par les compagnies aériennes et les pilotes, les réacteurs approvisionnés par le mélange de biocarburant et de kérosène ont enregistré les mêmes performances que les réacteurs normaux, et mieux encore, ils ont utilisé moins de carburant (3 600 livres au lieu de 3 700). Cela indique que le nouveau combustible est plus puissant.

Quelle que soit la compagnie aérienne, tous les vols d'essai ont été effectués avec un mélange de carburant particulier : un combustible dérivé du jatropha pour le vol d'Air New Zealand ; un carburant à base de jatropha et d'algues pour le vol de Continental Airlines, et un carburant mélangeant du jatropha, des algues et de la cameline pour le vol de Japan Airlines. Le dosage entre kérosène et biocarburant s'effectue toujours à hauteur de 50% chacun : 50% de Jet-A, et 50% de biocarburant.

Suite à ces tests, ces nouveaux types de carburants propres, pourront être certifiés et utilisés dans l'aviation commerciale d'ici quelques années. Cependant, ils ne sont pas encore produits en assez grande quantité pour pouvoir réduire significativement la proportion de kérosène utilisée par les compagnies aériennes. La société américaine Sustainable Oils estime que dans cinq ans elle pourra produire entre 150 et 180 millions de gallons annuels de biocarburant à base de cameline. Il s'agit en réalité d'une quantité négligeable pour un secteur qui en consomme plus de 60 milliards. Il faut alors se tourner vers d'autres solutions mieux adaptées.

Bien sur, les constructeurs de réacteurs ont procédé à des tests avec plusieurs autres huiles végétales, telles que l'huile de noix de Babassu, ou encore l'huile de noix de Coco. Mais le rendement de ces dernières n'est efficace que pour les petits véhicules tels les outils agricoles. L'idée d'utiliser ce genre d'huile a vite été abandonnée dans le secteur aérien.

Donc l'huile de Jatropha couplée à l'huile d'algue, est apparue être la solution la plus prometteuse. C'est celle qui a été retenue par les politiques d'investissement des différentes compagnies aériennes que nous venons d'étudier.

## **2) L'impact des bio-kérosènes sur le choix des investissements des compagnies aériennes et la gestion financière des aéroports.**

Comme nous l'avons étudié, on peut arriver maintenant à créer du bio-kérosène à partir de techniques qui n'ont pas d'impacts environnementaux. Ce biocarburant récent est en effet produit à partir de matières issues de la biomasse. Ce nouveau genre de bio-kérosène est en outre très énergétique: ses caractéristiques énergétiques sont très proches de celles du kérosène actuellement utilisé.

### **A) L'utilisation du gamma-valérolactone (GVL)**

Les chercheurs de tous continents ont pu réaliser un carburant propre à hauteur de 97%, et ce à partir de l'utilisation de la biomasse. Cette nouvelle énergie propre utilise très peu d'hydrogène, et réussit à capturer le CO<sub>2</sub> à l'aide d'une pression très importante qui lui permet d'être stockée.

Il y a donc une innovation quant à la matière première utilisée : Il ne s'agit pas seulement de l'utilisation d'algues, il existe également une exploitation de la biomasse, notamment le sucre contenu dans les végétaux.

Mais cela ne va pas sans problèmes. En effet, l'utilisation de cette biomasse nécessite des infrastructures importantes, notamment des installations de catalyseurs métalliques, afin de former un liquide organique, le GVL<sup>6</sup>. Ceci implique une modification de moteurs. L'installation et l'exploitation de ces infrastructures possèdent des coûts très élevés...

Malgré ce coût, l'usage de grandes installations de laboratoire et de catalyseurs à prix raisonnable, ont favorisé la production d'un important volume de carburant pur pour alimenter les appareils.

---

<sup>6</sup> Voir liste des abréviations, page 4

Pour les chercheurs en quête de nouveaux carburants propres, le GVL est un bio-kérosène parfait dans son efficacité. En outre il peut avoir une application dans le secteur de l'automobile puisque il peut également être ajouté aux carburants existants pour les voitures. Le seul bémol de cette découverte est le coût encore élevé du GVL.

### **B) Une solution complémentaire au GVL : L'Éthanol.**

Puisqu'il existe une forme de biocarburant déjà utilisé pour les voitures, l'éthanol, nous pourrions penser le réutiliser dans l'aviation. L'éthanol a déjà été utilisé par le Brésil pour des vols tests, sous forme de mélanges avec de l'essence, mais les tests ne furent pas très concluants, car l'éthanol possède une trop faible valeur énergétique. Il ne peut donc être utilisé pour les moteurs d'avion sans être préalablement mélangé à du kérosène normal. Pour pouvoir utiliser ce carburant, il faut alors créer un combustible hybride.

Par ailleurs, s'ajoute à ces difficultés un problème de compatibilité des matériaux du fait de l'interaction entre l'éthanol et de l'aluminium, car l'éthanol est un oxydant, et il ne faut pas que l'aluminium soit oxydé : d'où la nécessité de modifier certaines parties des moteurs.

Il existe également d'autres sources de biocarburant possible :

La société Honeywell UOP, par exemple, a pour rôle de créer du biocarburant à partir de biomasse, d'algues, et huiles de cuisson usagées.

Le point positif est qu'il n'y a pas besoin de réaliser de modifications sur les moteurs ou les cellules.

EADS<sup>7</sup> et sa filiale Eurocopter ont l'intention de créer des installations qui permettraient de produire du biocarburant à base d'algues. Le Brésil est pionnier en cette matière. Il s'agit ainsi d'un changement révolutionnaire, non seulement pour les réductions massives des émissions de CO<sub>2</sub>, mais aussi pour le système de production qui le mettra en place.

Parce qu'il possède des caractéristiques physiques et chimiques semblables à celles du diesel conventionnel, le biodiesel est utilisable sans qu'il y ait de problèmes majeurs à reporter. Il n'y a besoin de réaliser que quelques modifications de moteur, (remplacement de membranes ou de joints ou durites en particulier) parce que le biodiesel est un puissant solvant. Il arrive

---

<sup>7</sup> Voir liste des abréviations page 4

qu'il altère certains joints en caoutchouc ou des mousses, ou encore les peintures de protection.

L'éthanol, comme nous venons de le voir, n'est pas totalement compatible avec le carburant habituel. Toutefois il serait possible de l'utiliser en prenant quelques précautions.

L'éthanol possède des caractéristiques corrosives et donc peut abîmer certains métaux constituant du réacteur : Ce biocarburant peut faire fondre certains élastomères. Il faudra alors s'assurer de l'adéquation des éléments utilisés dans le fonctionnement d'alimentation et distribution de carburant, avant d'exploiter ce type de bio-kérosène.

Tous ces vérifications ont pour but d'une part d'éviter les dommages qui peuvent être portés aux équipements du moteur, et d'autre part de diminuer le risque de toute contamination du carburant<sup>8</sup> qui engendrerait un dysfonctionnement de ces moteurs (obstruction des filtres).

Tout comme dans le secteur automobile, le secteur aéronautique peut recourir à trois sortes d'éthanol afin d'en faire un carburant pour avion : il y a l'éthanol hydraté<sup>9</sup>, dans des moteurs diesel modifiés, ou l'éthanol anhydre (0-25%)<sup>10</sup>, ou encore l'éthanol anhydre sans additif (0-3%).

Avec ces trois types d'éthanol, une sonde calcule la quantité d'oxygène contenue dans le carburant, et transfère l'information au poste de commande qui ajuste en conséquence les solutions relatives à l'équilibre air/carburant (les points critiques sont notamment lors de l'injection, puis de l'allumage, et lors de la détonation).

---

<sup>8</sup> Notamment les gommages et les particules.

<sup>9</sup> Les moteurs doivent subir quelques modifications, parfois même doivent être créés dans le but de cet objectif. Il s'agit de la solution exploitée par le Brésil sur les appareils composés de moteurs à éthanol

<sup>10</sup> Actuellement, il est possible d'utiliser le bioéthanol anhydre en le mélangeant avec du carburant normal, à hauteur de 25%. Le Brésil se sert d'un mélange équivalent à 20-25% de bioéthanol afin d'alimenter ses appareils. Les Etats-Unis favorisent une solution hybride correspondant à 5-10% d'éthanol, sans procéder à des modifications du moteur.

Pour comprendre le concept, il faut savoir que les biocarburants sont soit exploités de façons pure, soit utilisés avec du combustibles fossile comme le pétrole. En portant un regard plus technique, les biocombustibles peuvent être consommés avec du diesel ou de l'essence normale et être compatibles avec des moteurs traditionnels sans qu'il soit besoin de les modifier. Ce genre de bio-kérosène, bien que moins énergétique, est beaucoup plus rentable. Mais afin de mélanger le biocarburant et le kérosène normal, les constructeurs aéronautiques et les motoristes doivent réfléchir à un système économique adéquat. Car les équipements nécessaires pour la transformation (filtres, catalyseurs, joints) ne sont présents qu'en quantité encore très limitée et leur utilisation représente de ce fait l'une des principales difficultés pour l'emploi des biocombustibles.

Il est très coûteux et difficile de modifier les moteurs. Il y a de nombreuses contraintes à respecter. Il faut par exemple que le nouveau carburant utilisé puisse conserver sa fluidité à -47°C comme à 39°C, il faut aussi en limiter les résidus de combustion, et le rendre compatible avec les réservoirs et réacteurs existants. Il sera possible de modifier ces réservoirs, mais pas d'en créer de nouveaux. Les biocarburants de seconde génération sont destinés à être mélangés à du JetA, jusqu'à ce que leur production soit suffisante pour qu'ils soient utilisés seuls. Les réacteurs doivent être fabriqués avec des matériaux spéciaux qui peuvent supporter une combustion avoisinant les 1000°. Si on change les caractéristiques des moteurs pour les rendre compatibles avec du bio-kérosène, il faut vérifier absolument que ces contraintes soient respectées.

Enfin, subsiste un autre problème : celui de du rendement énergétique. Il faut savoir que des appareils de type A380 comportent 500 à 600 fauteuils, et peuvent peser jusqu'à près de 600 tonnes à leur maximum. La poussée doit être équivalente à 1240 KN pour que l'avion puisse se propulser. Il faut donc veiller à ce que les biocarburants susceptibles d'être utilisés aient un rendement énergétique assez important.

C'est pourquoi plusieurs essais ont déjà eu lieu en février 2008, dans le but d'évaluer leur viabilité en exploitation commerciale.

De plus, il commence à y avoir de nombreuses directives qui encadrent l'introduction et l'utilisation des biocarburants au sein de l'UE<sup>11</sup>. Un carburant doit répondre à certaines

---

<sup>11</sup> Voir liste des sigles et abréviations page 4

caractéristiques garantissant le bon fonctionnement du moteur et les limites d'émissions prescrites par la loi.

Dans cette sous partie, nous venons de voir que l'utilisation de bio-kérosène n'est pas une chose facile. Il faut veiller à la compatibilité des moteurs lorsque l'on souhaite changer de combustible. Or changer la motorisation d'un Boeing 737 coûte en moyenne à 7 millions de dollars, et celle d'un A330 équivaut à 15 millions de dollars.

C'est pourquoi, les compagnies aériennes, lorsqu'elles décident d'utiliser le bio-kérosène à la place du kérosène, doivent calculer la rentabilité de ces investissements. Est-il plus facile de changer tous les réacteurs d'un avion en même temps et voler pendant 200 000 h pour un investissement allant de 7 à 15 millions de dollars, ou changer tous les ans un réacteur afin de le faire fonctionner seulement au bio-kérosène et conserver les trois autres avec du kérosène normal ?

Ces politiques d'investissement se font en coopération entre les compagnies et les constructeurs de motorisation, en tenant compte des lois en vigueur.

Le remplacement du kérosène reste à l'évidence encore un problème épineux.

### **C Les aspects de gestion :**

Outre les impacts directs sur la filière énergétique, la production et l'utilisation des nouveaux carburants impliquent des modifications profondes dans les investissements et la gestion des compagnies et des constructeurs.

L'utilisation d'un nouveau carburant doit en outre engendrer de profondes réflexions sur le management et la logistique établie au sein des aéroports. Il faut que ces derniers mettent en valeur les questions de transport et de conservation du bio-kérosène tout en respectant les contraintes de ce dernier.

Comme chaque innovation, cela favorisera par ailleurs la création d'emplois au sein des filières liées à l'aéronautique.

#### **i) L'utilisation du kérosène vert favorise la création d'emploi :**

Au Royaume-Uni, British Airways a prévu d'utiliser 500 000 tonnes de déchets pour produire environ 16 millions de gallons de carburant au sein d'une usine implantée dans l'Est de Londres. L'objectif est de démarrer la production à partir de 2014 ; ceci permettra de créer jusqu'à 1.200 emplois. L'usine produira le double du volume de carburant nécessaire pour satisfaire tous les vols au départ de London City Airport (mais cela ne représente que 2% des vols au départ de Heathrow). L'usine utilisera la technologie de gazéification au plasma de Solena Group (SPG), qui peut traiter plus de déchets 20-50% que les technologies de gazéification conventionnelle.

Nous pouvons imaginer que si l'Angleterre réalise ce projet, beaucoup de pays la suivront.

## **ii) Avantages économiques :**

Lorsqu'un avion consomme 60 litres de kérosène à l'heure, cela coûte à la compagnie 86\$. Les évaluations actuelles montrent que l'utilisation de biocarburant permettra non seulement d'avoir 30% de combustible en plus, mais aussi une réduction de 57\$. L'heure de vol sera ainsi facturée 28\$. Avec une moyenne de 200 000h pour des réacteurs, on peut espérer une économie de 11.5 millions de \$ !

## **iii) Modèle de gestion aéroportuaire et faisabilité :**

La dépendance du secteur du transport aérien en ce qui concerne les combustibles fossiles montre qu'il y a un lien direct entre la fluctuation du prix du baril, et la demande. Récemment, avec la crise financière, on a assisté à une nette baisse de la demande d'approvisionnement : par exemple la politique menée par les compagnies en ce qui concerne les restrictions de bagages afin d'alléger les appareils, l'utilisation du yield management afin de remplir les avions au maximum...

Le bio-kérosène est donc une alternative attrayante, car sa production n'est pas dépendante d'une ressource limitée comme le pétrole conventionnel. Le biocarburant ne se trouve pas dans des nappes donc il n'y a pas besoin d'extraction. Les énergies renouvelables ont des sources d'approvisionnement géographiquement diversifiées. Comme nous l'avons déjà abordé, les éléments constituant les biocarburants peuvent être cultivés dans de nombreux endroits à travers le monde, favorisant les lieux où l'industrie aéronautique est présente.

Comme pour le pétrole, il commence déjà à émerger de grands producteurs de biocarburants. Un système de transport sera mis en place, de l'endroit de production – mais rien n'empêchera un laboratoire d'être situé à proximité des aéroports-, jusqu'au lieu de son utilisation. Mais une échelle locale d'approvisionnement sera également établie : l'installation d'un circuit interne au sein de l'aéroport en ce qui concerne la gestion des biocarburants – traçabilité, suivi, approvisionnement, exploitation...-.

L'industrie aéronautique a connu une croissance énorme depuis sa création. Aujourd'hui, plus de deux milliards de passagers bénéficient chaque année des avantages sociaux et économiques des vols. L'industrie à travers le monde fournit des emplois à quelque 32 millions de personnes, et participe à hauteur d'environ 7.5% du produit intérieur brut mondial.

La distribution de carburants pour l'aviation commerciale se situe sur une échelle plus petite et moins complexe que celle du secteur automobile. Pour cette raison, il est plus facile de mettre en œuvre l'utilisation des biocarburants. A titre d'exemple, il y a 161.768 stations d'essence aux États-Unis. En comparaison, il n'y a que 1679 aéroports. Dans un même souci de comparaison, il ya environ 580 millions de véhicules sur la route aujourd'hui, comparés à seulement 23.000 avions pour 2.000 compagnies aériennes dans le monde.

L'intégration des biocarburants dans le secteur aéronautique est donc beaucoup plus facile qu'elle ne le serait dans un autre secteur.

#### **iv) Viabilité économique :**

Les combustibles fossiles vont devenir de plus en plus rares et par conséquent deviendront plus chers.

On estime que 85% des coûts de production des biocarburants reviennent au coût de la matière première. Comme la technologie pour exploiter et transformer ces matières premières

progresse, les combustibles seront disponibles en grandes quantités commerciales, ainsi le prix va baisser. En raison de leur caractère renouvelable, ces matières premières peuvent continuer à être produites, encore et encore.

Le prix du pétrole peut varier considérablement, passant d'un maximum de 147 dollars le baril en Juin 2008, à 40 dollars en décembre 2008. Il est donc difficile de prévoir dans quelle période les biocarburants seront compétitifs, mais il ya de fortes probabilités que les biocarburants deviennent disponibles à des coûts comparables au carburant traditionnel, le Jet A-1, aux alentours de 2020.

D'autant qu'il y a des coûts supplémentaires liés à l'utilisation de combustibles fossiles. On peut citer par exemple la loi adoptée par l'Union Européenne de 2008 qui préconise d'inclure une taxe carbone pour le secteur aéronautique, imposant aux compagnies aériennes de payer leurs émissions de carbone dès 2012.

### **3) L'utilisation de l'énergie Solaire pour remplacer le Kérosène.**

#### **A) Solar Impulse, le premier Avion solaire**

Au début du moi de mai 2011, il y a eu un évènement majeur dans l'histoire des énergies propres. Le premier voyage international de Solar Impulse, un avion toute nouvel génération, dont les moteurs sont alimentés à cent pour cent grâce à l'énergie solaire. En effet, près de 12 000 cellules photovoltaïques recouvrent les ailes.

Solar Impulse a été conçu par deux anciens pilotes Bertrand Piccard et...

Il absorbe l'énergie solaire grâce aux 200 m<sup>2</sup> de panneaux solaires fixés sur ses ailes. Ils alimentent ensuite quatre moteurs d'une puissance équivalente à celle d'une petite moto.

Solar Impulse a déjà réussi plusieurs exploits, car il a déjà survolé la Suisse et la Belgique pendant un voyage de 500 km parcouru à une vitesse moyenne de 70 km/h.

Un des objectifs de cette recherche est de montrer qu'il existe encore beaucoup de techniques encore inexploitées dans le secteur des énergies renouvelables. Selon le concepteur du projet Bertrand Piccard, ce vol a pour vocation d'encourager les l'adoption de politiques énergétiques plus ambitieuses. En particulier dans un contexte d'augmentation du prix des énergies fossiles, il est utile que les chercheurs testent le plus grand nombre de projets afin de tirer parti des énergies renouvelables.

Le prochain objectif de Solar Impulse est de construire un deuxième appareil possédant de meilleures performances et avec lequel il sera possible d'effectuer la traversée de l'Atlantique en 2013.

#### **B) Gestion économique de l'énergie solaire : L'énergie solaire aura du mal à supplanter le pétrole**

Certes nous arrivons maintenant à transporter des personnes pendant 24 heures, grâce à un appareil seulement propulsé par l'énergie solaire. Toutefois il ne s'agit aujourd'hui que d'un nombre très limité de passagers (deux pilotes).

Cette innovation et la réussite de l'exploitation de cette source d'énergie va entraîner de nombreuses recherches dans le secteur de l'économie d'énergie.

Ainsi on peut analyser la gestion de l'efficacité des composants, ainsi que les coûts portés sur la recherche continue d'un meilleur rendement des cellules solaires. On pourra en outre résoudre les problèmes de gestion des stocks d'énergie. Mais avant tout, il faut accepter de prendre encore quelques années pour continuer à développer le savoir-faire et maîtriser ces nouvelles technologies.

Toutefois l'énergie solaire utilisée seule n'est pas suffisante. Dans le futur moyen terme, on peut penser que l'approvisionnement idéal en énergie sera constitué d'une grande diversité de sources: solaire, éolienne, hydraulique, marémotrice, etc. Mais en ce moment, nous n'avons pas trouvé de systèmes énergétiques qui réussissent à exploiter toutes ces sources. Il restera donc une demande toujours importante pour les énergies fossiles pétrole, le charbon et le nucléaire.

### **III) Hypothèses d'études :**

**Hypothèse 1 :** *Un régime mixte combinant l'utilisation de carburants issus des recherches en cours et l'utilisation des carburants traditionnels a-t-il un intérêt technique et économique ?*

Il s'agira d'étudier si les acteurs économiques estiment viable de gérer la combinaison de l'innovation et de l'existant ou s'ils ne préféreront pas soit attendre l'aboutissement des recherches pour passer à un système nouveau soit développer des recherches pour essayer de sauvegarder le carburant traditionnel.

**Hypothèse 2 :** *Outre le problème des terres arables, il y a des défis technologiques.*

Compte tenu de l'importance des changements à opérer dans l'ensemble des systèmes d'exploitation et de logistique, il s'agira d'étudier si le coût du litre du bio-kérosène est un élément déclencheur du changement.

**Hypothèse 3 :** *Le concept d'un carburant non polluant est un concept suffisamment attractif auprès du voyageur pour emporter sa préférence. Voici une hypothèse importante car elle permet de connaître les attentes des voyageurs. Si ces derniers sont prêts à payer 5% de plus pour soutenir le développement des énergies propres, alors il peut y avoir un impact sur l'exploitation des biocarburants.*

### **Plan de bataille méthodologique :**

## **Démarche de résolution des hypothèses :**

Durant cette année, j'ai réalisé la phase de questionnement, c'est-à-dire que j'ai rassemblé plusieurs documents et informations sur la thématique choisie.

Afin de valider mes hypothèses, je consulterai les chercheurs et gestionnaires des constructeurs, des compagnies aériennes et des aéroports. J'ai déjà commencé à le faire, et je continuerai : j'assisterai aux conférences touchant de près ou de loin à mon domaine de recherche. Parce qu'à ce stade-ci, il est bon de synthétiser les acquis.

J'ai prévu quatre rendez-vous avec des professionnels du secteur : Un ingénieur aéronautique dans le carburant, qui a longtemps travaillé pour airbus. J'interviewerai cet ingénieur afin de mieux maîtriser les notions de rendement entre les différents carburants. J'ai aussi pris un rendez-vous avec un pilote de ligne chez air France. Je m'entretiendrai avec lui afin de connaître plus précisément comment s'effectue le choix de tel ou tel carburant, ou encore quelle quantité prendre. Comme autre contact qui accepterait de me recevoir, il y a Dominique Gallois, économiste au journal « Le Monde », spécialisé dans les questions aéronautiques. Il pourra me parler de l'avènement de nouveaux moteurs, ce qui, selon lui, est une révolution car ils consomment quatre fois moins de kérosène que les anciens. Comme quatrième personne, il y a le concepteur du projet Solaris, que je compte voir dans les salons aéronautiques (le Bourget fin Juin, Orly mi Octobre). Enfin d'autres personnes m'ont confirmé qu'elles étaient prêtes à être interviewées afin de répondre à toutes mes questions.

## **La démarche méthodologique**

Je commencerai par identifier les différentes étapes à réaliser pour en arriver à résoudre ma problématique de recherche.

Cependant, je vais lier la méthodologie au cadre plus restreint de la récolte d'informations (ou de la recherche proprement dite). J'utiliserai donc les différentes pratiques de recueil d'informations telles que l'enquête par questionnaires, l'entretien, l'observation directe ou encore le recueil des données secondaires et documentaires en les analysant.

Je mettrai en ligne des documents qui permettront aux personnes ciblées par mes recherches, de pouvoir me faire part de leur opinions et points de vue sur les domaines abordés : je mettrai un questionnaire à réponses fermées et à choix multiples. Par exemple : « Selon vous, êtes-vous prêt à payer une place d'avion 5% plus cher et favoriser activement le développement de carburants propres, ou payer 5% moins cher et polluer plus ? »

Je pourrai ainsi procéder à la validation de mes hypothèses.

## Partie 2 : Méthodologie

### 1) Etude qualitative

Pour répondre à ma problématique, j'ai formulé les trois hypothèses que j'ai présenté juste précédemment.

Afin d'établir une confirmation, ou au contraire une infirmation, j'ai employé deux méthodes méthodologiques. Dans un premier temps, j'ai réalisé une étude qualitative<sup>12</sup>. C'est-à-dire que j'ai rencontré plusieurs professionnels du secteur aéronautique et des transports en généraux. Je suis allé les rencontrer, et j'ai réalisé un tableau croisé dynamique en fonction du professionnel rencontré et des questions posées. Au-delà de ce tableau, dont je présenterai les grandes lignes, j'ai réalisé une matrice strength weakness opportunity threat (SWOT), afin de confirmer ce que les professionnels m'ont rapportés.

---

<sup>12</sup> Vous trouverez l'intégralité du questionnaire d'entretien à la fin du mémoire, en annexes, partie A

	<b><u>Entretien 1 :</u></b> Thierry Mariani, ministre du transport	<b><u>Entretien 2 :</u></b> Bertrand Piccard, pilote	<b><u>Entretien 3 :</u></b> Philippe Tixier, ingénieur aéronautique	<b><u>Entretien 4 :</u></b> Mr Apollin, commandant de bord chez Air France
<p>Question 1</p> <p>L'industrie aéronautique est-elle organisée pour faire face à l'avènement d'un carburant hybride entre le Jet A conventionnel et le Bio-Kérosène ?</p>	8 000 avions voleront d'ici 20 ans à l'aide du bio-kérosène. En ce moment, nous sommes à 50 avions prototypes.	Avec la hausse du prix du pétrole, il y aura un choc qui permettra à l'aéronautique de favoriser un nouveau carburant	La création de bio-Kérosène est une activité émergente. Les équipementiers aéronautiques sont en train de s'organiser pour sa venue	La technologie, nous l'avons ! Mais ce qui manque, c'est l'encadrement de cette technologie par les lois. Il faut de nouvelles normes qui régissent la fabrication du bio-kérosène
<p>Question 2</p> <p>La place de plus en plus importante occupée par les défis environnementaux, ne constitue-t-elle pas un défi technologique pour les futurs appareils ?</p>	Le secteur aéronautique est un secteur qui a toujours été empreint d'exigences drastiques en ce qui concerne les innovations et les recherches technologiques. Ces exigences sont répercutées par de nouvelles normes.	les industries aéronautiques se tournent vers les hautes technologies. C'est grâce à la R&D qu'on va pouvoir développer des appareils toujours plus propres et économiques. (exemple du catalyseur).	Il ne s'agit pas d'un défi à proprement parler, car cette révolution environnementale est déjà en cours depuis une décennie. Il y a une rupture technologique, bien sûr, mais on arrive à la surmonter	Je ne pense pas qu'il s'agisse ici d'un problème purement technologique. Il commence à y avoir un réveil de conscience. A partir de là, tout est joué ! En effet, on a réduit de 5 la consommation de carburant en kg/km/passager.

<p><b>Question 3</b></p> <p>Dans quelles proportions les moteurs d'avions sont-ils devenus plus respectueux de l'environnement ?</p>	<p>Le secteur aérien émet seulement 2% du CO2 (dioxyde de carbone) diffusé à travers le monde. Du moins jusqu'à aujourd'hui... Selon les prévisions des Nations Unies, il se pourrait bien que ce pourcentage augmente vers 3 voire 3.5%.</p>	<p>De nombreuses pistes sont exploitées afin de continuer à réduire l'empreinte environnementale : il y a bien sûr les carburants alternatifs, mais il y a également des recherches en cours sur une possibilité d'allègement des carlingues, sur l'aérodynamique, et enfin sur la conception de nouveaux moteurs moins énergivores</p>	<p>Le secteur aérien est conscient de la pollution qu'il crée. C'est pourquoi les gros équipementiers aéronautiques dépensent 80 % de leurs moyens financiers en Recherche &amp; Développement, afin de minimiser encore plus les impacts environnementaux.</p>	<p>La réponse est simple, de nos jours, les appareils sont 75 % plus performants sur le domaine énergétique, et 80 % plus silencieux qu'il y a quarante-cinq ans, soit 20 % qu'il y a dix ans ! Cette amélioration va continuer à s'accroître grâce au développement des bio-kérosènes</p>
<p><b>Question 4</b></p> <p>L'intégration des biocarburants dans les réacteurs d'avions apparaît comme une piste de progrès. Qu'est-ce que cela peut induire au niveau de la conception ?</p>	<p>On a réussi à obtenir du biocarburant grâce à la modification du mécanisme de photosynthèse. Cette dernière n'est non plus réalisée par le soleil, mais est faite à l'aide de bactéries. Les chercheurs ont réussi, grâce à ces bactéries, à fabriquer de l'hydrogène gazeux à partir de végétaux</p>	<p>Les explications techniques que l'on fournit pour le moment sont en faibles quantités car il s'agit d'une innovation en cours de développement. On se contente juste de parler d'un carburant non fossile, dit de seconde génération.</p>	<p>Il faut avoir à l'esprit que lors de la conception de carburants alternatifs, il faut étudier plusieurs facteurs importants : les facteurs écologiques, certes, mais aussi énergétiques : il ne faut pas que le biocarburant supplante les cultures destinées à la population.</p>	<p>Au stade actuel des recherches, nous en sommes au même niveau que dans le secteur de l'automobile : il faut incorporer une quantité minimale de bio-kérosène, la majeure partie étant Jet-A classique. La flotte Air France a utilisé 3 milliards de litres de kérosène conventionnel, soit environ 2,360 millions de tonnes de biomasse aquatique.</p>
<p><b>Question 5 :</b></p> <p>Quel est le taux de bio-kérosène maximum admissible au sein d'un mélange de carburant pour avions ?</p>	<p>Suite au roundtable sur le pétrole durable, il y a eu une approbation finale en ce qui concerne l'utilisation commerciale du bio-kérosène. Les moteurs doivent contenir un mélange maximum de 50% de carburant jet-A, et 50% de bio-</p>	<p>N/A</p>	<p>plusieurs compagnies aériennes telles que KLM, ou Singapore Airlines ont annoncé des prévisions de vols qui utilisent 50% de bio-kérosène et 50% de jet-A. Je pense que le régime mixte 50-50 est le maximum admissible. Au-delà, il faudra produire du</p>	<p>N/A</p>

	kérosène. Ces mélanges ne sont pas donnés par hasard, ils proviennent des normes de certifications du corps ASTM International		biocarburant en trop grosse quantité pour non seulement nourrir la planète, et faire voler les avions.	
<p><b>Question 6</b></p> <p>Faut-il augmenter massivement la production de biocarburant pour permettre d'enrayer la consommation de pétrole dans les transports ?</p>	<p>On se heurte ici à un problème de ressources.</p> <p>Si on augmente la production de biocarburant, on réduit les terres de cultures destinées à l'alimentation de la planète</p>	<p>3% de la consommation mondiale de pétrole ont utilisé 30 millions d'hectares de terres arables, soit 1.6% des terres arables du monde entier. Il faut donc trouver un juste milieu entre biocarburant et énergie conventionnelle</p>	<p>Certes, il faut augmenter la production de biocarburant, tout en veillant à ne pas mordre sur l'écosystème ni sur nos besoins alimentaires, qui ne cessent d'augmenter avec la hausse de la population.</p>	<p>Nous sommes limités par une éthique mondiale. Ce qu'il faut, c'est réduire nos besoins en énergie, et d'améliorer l'allocation de nos ressources afin de produire de l'énergie.</p>
<p><b>Question 7</b></p> <p>Il y a t-il assez de terres agricoles pour produire des biocarburants et nourrir la planète ?</p>	<p>Non, car Avec l'augmentation de la population mondiale et la généralisation de régimes alimentaires plus riches en viande dans les pays émergents, la production alimentaire va devoir augmenter fortement.</p>	<p>Aujourd'hui, la réponse est rapide : Non. Ce qu'il faut faire, ce sont des cultures de biocarburant dans des bâtiments à étages. C'est-à-dire, rendre vertical la production de biocarburant pour ne pas prendre la place des terres arables</p>	<p>Oui. La surface agricole n'a pas été proportionnelle à la production alimentaire, grâce à l'augmentation régulière des rendements à l'hectare. Mais les années 2008-2010 ont été marquées par des prix exceptionnellement élevés</p>	<p>Non. En effet, les terres agricoles représentent 16% de la surface de notre planète. La production de biocarburant en prend 2%. Il faut trouver un compromis entre les deux.</p>

## 2) Matrice SWOT

L'analyse des quatre interviews effectuées, permet d'établir la matrice SWOT suivante. Cette matrice est utile car elle reprend les données recueillies et les classes en fonction de leurs forces, faiblesse, menace, ou opportunité.

Forces	Faiblesses
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Les biocarburants de 2<sup>ème</sup> génération s'inscrivent dans le développement durable et la diminution des gaz à effet de serre.</li> <li>Pas de concurrence avec d'autres formes de technologies : pas d'effet sur les prix agricoles.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Verrous technologiques et économiques à surmonter pour une production massive.</li> <li>- Exigence d'une bonne collaboration entre les acteurs : fournisseurs, transformateurs, distributeurs, politiques</li> </ul>
Opportunités	Menaces
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bilan négatif des biocarburants de 1<sup>ère</sup> génération</li> <li>- Réveil planétaire.</li> <li>- Dévalorisation des sous-produits des biocarburants de 1<sup>ère</sup> génération Des essais de vols à base de bio-kérosène ont lieu un peu partout</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Matières premières : leurs quantités sont-elles suffisantes? On se demande (surface arable, déforestation, érosion des sols,...).</li> <li>- Absence de données concernant le bilan carbone + consommations intermédiaires.</li> </ul>

### 3) Etude quantitative :

Afin de répondre à ma troisième hypothèse, j'ai effectué un sondage parmi un échantillon représentatif de la population française. J'ai obtenu 155 réponses de questionnaires, que j'ai traités par la suite. Les résultats obtenus conditionnent la validation de l'hypothèse numéro trois. L'étude de ces réponses sont donnés dans la grande partie trois : résultats d'hypothèses.

Ci-dessous, voici les questions issues du questionnaire :

Question 1= Avez-vous déjà entendu parler de biocarburant ? (oui/non)

Question 2= Quels types d'énergie renouvelables connaissez-vous ? (Energie solaire, sable bitumeux, algues, éolien, marée motrice, colza et huile, biomasse, géothermie).

Question 3= selon vous, qu'attendez-vous des énergies renouvelables dans le secteur du transport ? (une réduction des coûts pour le consommateur, une protection accrue de l'environnement, favoriser l'investissement socialement responsable des entreprises, favoriser la démarche éthique des sociétés de transports, la disponibilité rapide sur le marché de ce type d'énergie)

Question 4 = connaissez-vous l'existence de biocarburants destinés au secteur aéronautique ? (oui/non).

Question 5= Si oui, lesquels ? (bio-kérosène, alliage jet-A et jatropha, alliage sable bitumineux et algues marines, hydrogène, méthane liquide)

Question 6 = quels seraient selon vous les inconvénients d'un carburant vert destiné à l'aéronautique ?

Question 7 = le coût élevé du litre de kérosène serait-il un élément déclencheur du changement vers une nouvelle énergie verte ? (oui/non/je ne sais pas)

Question 8 = sur une échelle de 1 à 10, un carburant bon marché est : 1- de mauvaise qualité, à 10- bonne qualité

Question 9 = sur une échelle de 1 à 10, selon vous, un carburant de qualité est : 1- non respectueux de l'environnement, à 10- respectueux de l'environnement.

Question 10 = seriez-vous prêts à payer un billet d'avion 2% plus cher et favoriser la protection de l'environnement ? (oui/non)

Question 11 = vous êtes : collégien/lycéen, étudiant, cadre, en recherche d'emploi, profession libérale, agriculteur, ouvrier, autre actif.

Question 12 = ce sont les tranches d'âges

Question 13 = Vous êtes : un homme, une femme.

## **Partie 3 : Résultats d'hypothèses :**

Voici maintenant les résultats des hypothèses que je me suis posées.

**Hypothèse 1 :** *Un régime mixte combinant l'utilisation de carburants issus des recherches en cours et l'utilisation des carburants traditionnels a-t-il un intérêt technique et économique ?*

Le processus de développement de cette nouvelle énergie s'effectue par phase successives. Il faut trouver des fournisseurs, des matières premières durables et entreprendre l'essai des moteurs. Les compagnies également se soumettent à des procédures concernant les processus de validation.

Maintenant, l'objectif est que ces essais permettent de réaliser des vols 50-50 avec du carburant alternatif et conventionnel<sup>13</sup>. La matrice SWOT effectuée dans la partie précédente nous présente les intérêts économiques de l'utilisation du bio-kérosène : Il n'y a pas de concurrence avec d'autres formes de technologies, et il n'y a pas d'effets sur les prix agricoles.

En ce qui concerne la constitution de carburant de seconde génération, on a recours également aux matériaux à base de bois tels que les plants de maïs ou de colza.

Les pieds de maïs sont constitués de feuilles et des tiges qui sont laissés dans les champs après la récolte des grains de maïs. Après de nombreuses études, des chercheurs américains ont évalués que la canne de maïs pourrait fournir jusqu'à 25% de la récolte globale de biocarburant nécessaire en 2030.

Ces résidus organiques provenant de l'agriculture et des activités forestières sont connues pour avoir d'excellentes propriétés telles que la densité d'énergie élevée et la miscibilité avec des carburants conventionnels ; en plus les coûts de production très compétitifs.

Par ailleurs, il y a eu aux Etats-Unis le « roundtable on sustainable oil palm ». Lors de cette rencontre entre les entreprises leader du secteur énergétique, il y a eu des normes qui ont été adoptées afin de favoriser l'utilisation de carburants mixtes. Les moteurs doivent contenir un mélange maximum de 50% carburant jet-A, et 50% de bio-kérosène. Ces mélanges ne sont pas donnés par hasard, ils proviennent des normes de certifications du corps ASTM International. D'un point de vue du rendement, ce mélange 50 :50 réduit jusqu'à 60% le gaz à effet de serre.

---

<sup>13</sup> (gas-to-liquid), BTL (biomass-to-liquid)

Donc suite aux interviews réalisées avec les professionnels du secteur, et avec l'aide du tableau analytique et de la matrice SWOT, on peut considérer que l'hypothèse est validée. Les régimes mixtes ont un intérêt technique et économique.

**Hypothèse 2 :** Outre le problème des terres arables, il y a des défis technologiques.

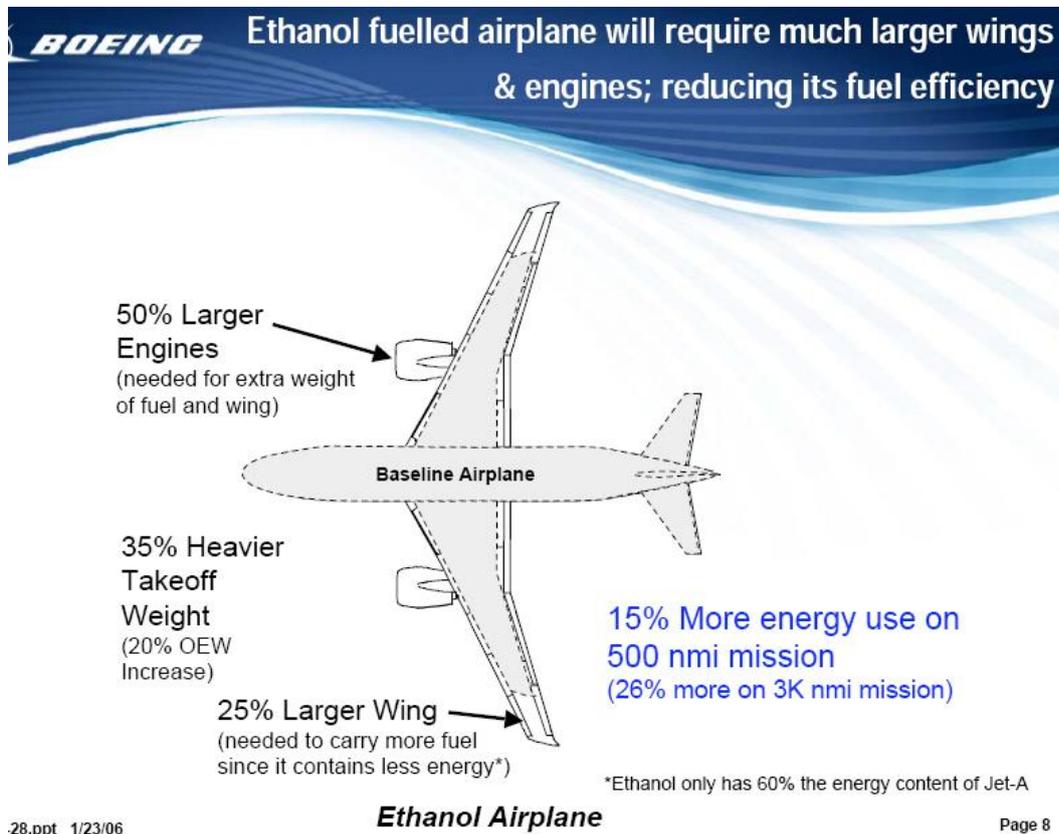


Fig a: Evaluation of Bio-Derived Synthetic Paraffinic Kerosenes, 2006

a) Lorsque les appareils utiliseront de l'éthanol, voici les modifications à effectuer :

Modifications à effectuer sur les appareils actuels de type Boeing 777 afin de les faire voler avec du bio-kérosène. En fonction des différents types de carburants, on modifiera diverses parties du fuselage des appareils.

Dans le cadre de l'utilisation de l'Éthanol en tant que kérosène alternatif, il faut que les constructeurs aéronautiques allongent les ailes de +25%, car l'éthanol est moins énergétique que le carburant Jet-A classique<sup>14</sup>. L'allongement de ces ailes permet de recevoir plus de carburant, et de compenser ainsi les 40% d'énergie manquante par rapport au kérosène habituel.

<sup>14</sup> L'éthanol correspond à 60% de l'énergie contenu dans le Jet-A conventionnel.

Il y a un autre élément fondamental de changement : les réacteurs. Ces derniers doivent être 50% plus larges que ceux des Boeing 777 fonctionnant au Kérosène conventionnel. Ces réacteurs doivent être très larges afin de compenser l'augmentation de voilure des ailes. Au final, les Boeing 777 qui volent avec du bio-kérosène à base d'éthanol utilisent 15% d'énergie supplémentaire par rapport aux Boeing 777 conventionnel pour une distance de 500 miles nautiques, et 26% d'énergie supplémentaire pour un trajet de 3 000 miles nautiques. Donc si on utilise un biocarburant à base d'éthanol, l'appareil sera beaucoup moins polluant qu'un appareil alimenté par du pétrole. En revanche il consommera un peu plus d'énergie.

b) Lorsque les appareils utiliseront de l'éthanol, voici les modifications à effectuer :

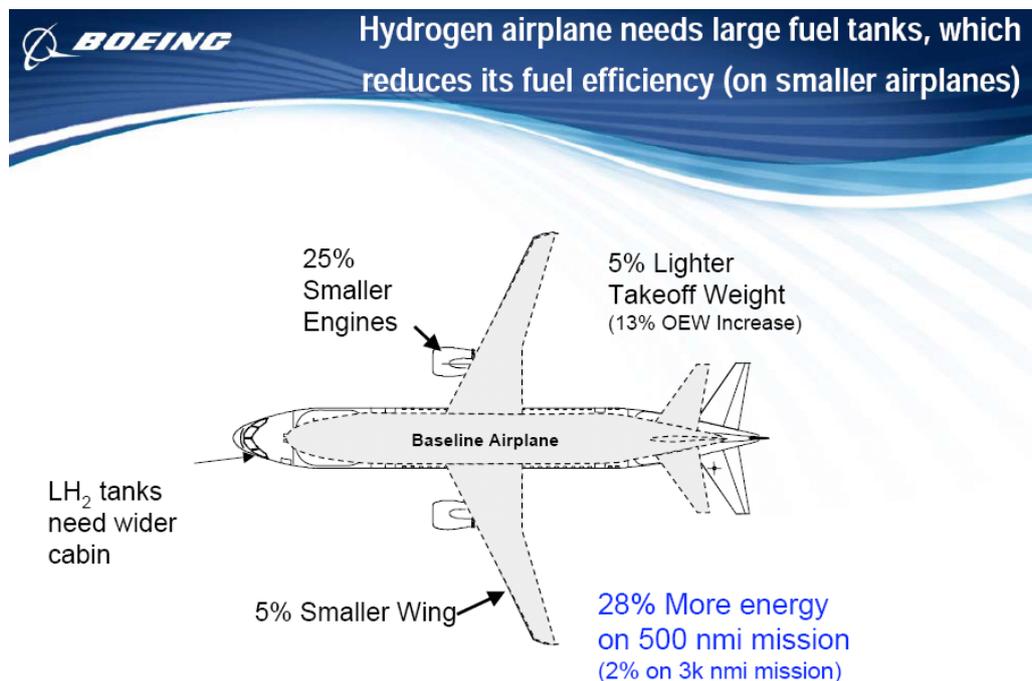


Fig b : *Evaluation of Bio-Derived Synthetic Paraffinic Kerosenes, 2006*

Si l'on utilise un biocarburant à base d'hydrogène il y aura aussi des modifications à effectuer au sein de l'appareil. Tout d'abord, les réacteurs seront 25% plus petits que ceux des Boeing 777 normaux. Ensuite, comme l'hydrogène est un gaz très léger, l'appareil fonctionnant au biocarburant aura un poids de 5% plus faible qu'un 777 habituel. Comme l'avion sera plus léger, les ailes seront également plus courtes de 5%.

L'aspect sécurité intervient aussi au moment de la transformation de l'appareil : comme l'hydrogène est un gaz dangereux, il faut veiller à ce que des règles de sécurité soient respectées. Ainsi le cockpit des nouveaux appareils sera élargi.

Enfin, les transformations effectuées aux nouveaux appareils destinés à voler aux bio-kérosène, permettent de gagner 28% d'énergie supplémentaire sur les parcours de 500 miles nautiques, et 2.5% sur les parcours de 3 000 km.

Donc pour faire voler un avion avec du bio-kérosène il faut préférer choisir un biocarburant à base d'hydrogène plutôt qu'à base d'éthanol. Le souci en revanche de l'hydrogène, c'est que la production de ce gaz coûte cher.

Prenons un exemple : Pour un vol de Seattle à Washington, chaque passager consomme environ 29 gallons de fuel. Il faut pour chaque passager, ½ acre d'algues pour obtenir 100% de bio-Kérosène pour un passager.

L'hypothèse deux est donc validée. Il faut effectivement se trouver à la pointe de la technologie pour faire voler un avion à l'aide de bio-kérosène : il faut transformer le fuselage des appareils, et cela tout en respectant les lois de la physique.

**Hypothèse 3** : *Le concept d'un carburant non polluant est un concept suffisamment attractif auprès du voyageur pour emporter sa préférence*

a) Voici l'analyse des réponses que j'ai pu obtenir :

- 94% des gens ont déjà entendu parler de Biocarburant.  
- 100% de ces personnes connaissent l'énergie solaire, et 96% connaissent l'énergie éolienne. En troisième position, l'énergie la plus connue selon les individus est l'énergie géothermique<sup>15</sup>.

Pour la majorité des gens, les énergies renouvelables ont pour vocation de protéger l'environnement. Cette prise de conscience se trouve en corrélation avec la conjoncture économique. C'est pourquoi la seconde priorité des sondés est la réduction des coûts des consommateurs.

En ce qui concerne le biocarburant dans le secteur aéronautique, 67.76% des sondés ne connaissent pas l'existence de ces nouveaux biocarburants. Parmi les 32.24% des sondés qui connaissent l'existence de biocarburant aéronautiques, la principale énergie connue est le Bio-kérosène, et étonnement, la seconde énergie est l'hydrogène.

Pour 71.71% des sondé, c'est le coût actuel du kérosène jet-A qui est un élément déclencheur de la recherche de nouveau carburants.

---

<sup>15</sup> Les résultats complets de l'enquête se trouvent en Annexe.

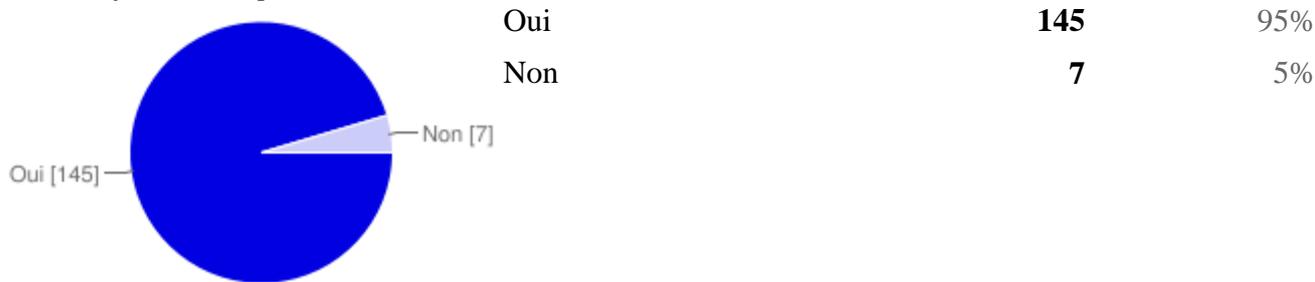
Pour 55.26% des sondés, ils seraient prêts à payer un billet d'avion un peu plus cher et favoriser la protection de l'environnement.

Les biocarburants dans le secteur aéronautique ont d'avantage d'impacts sur les générations jeunes. En effet, 78% des sondés ont entre 16 et 25 ans. Et les femmes sont d'avantage plus sensibles à la protection de l'environnement ( 57.39%) que les hommes (42,61%).

b) Voici maintenant les graphiques du sondage.

Nombre de sondés: 153 responses

1) Avez-vous déjà entendu parler de Biocarburant ?



2) Quels types d'énergie renouvelables connaissez-vous ?

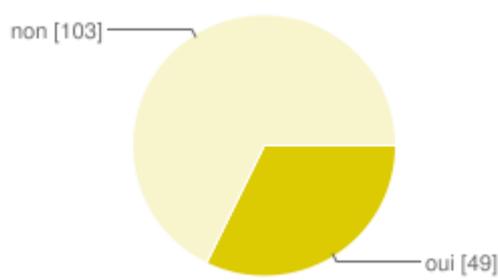
Energie Solaire	<b>151</b>	<b>100%</b>
Algues	<b>45</b>	<b>30%</b>
Sable Bitumineux	<b>9</b>	<b>6%</b>
Eolien	<b>145</b>	<b>96%</b>
Marée Motrice	<b>68</b>	<b>45%</b>
Colza et Huiles	<b>87</b>	<b>58%</b>
Biomasse	<b>52</b>	<b>34%</b>
Géothermique	<b>96</b>	<b>64%</b>

People may select more than one checkbox, so percentages may add up to more than 100%.

3) Selon vous, qu'attendez-vous des énergies renouvelables dans le secteur du transport ?

Une réduction des coûts pour le consommateur	<b>30</b>	<b>20%</b>
Une protection accrue de l'environnement	<b>82</b>	<b>54%</b>
Favoriser l'Investissement Socialement Responsable des entreprises	<b>7</b>	<b>5%</b>
Favoriser la démarche Ethique des sociétés de transport	<b>10</b>	<b>7%</b>
La disponibilité rapide sur le marché de ce type d'énergie	<b>21</b>	<b>14%</b>

4) Connaissez vous l'existence de biocarburant destiné au secteur aéronautique ?



oui	<b>49</b>	32%
non	<b>103</b>	67%

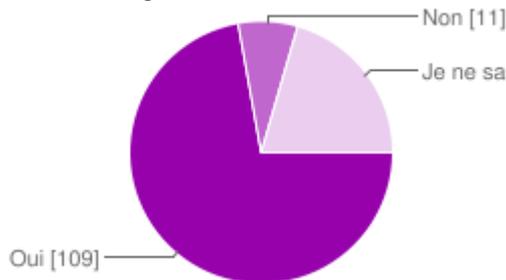
5) Si oui, lesquels ?

Bio-Kérosène	<b>36</b>	77%
Alliage Jet-A et Jatropa	<b>4</b>	9%
Alliage Sable Bitumeux et Algues marines	<b>5</b>	11%
Hydrogène	<b>20</b>	43%
Méthane liquide	<b>6</b>	13%

People may select more than one checkbox, so percentages may add up to more than 100%.

6) Non Applicable (N/A)

7) Le coût élevé du litre du kérosène serai-t-il un élément déclencheur du changement vers une nouvelle énergie « verte » ?

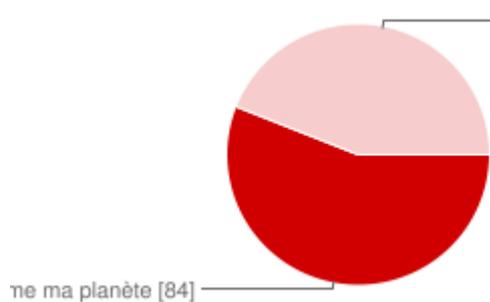


Oui	<b>109</b>
Non	<b>11</b>
Je ne sais pas	<b>31</b>

8) Non Applicable (N/A)

9) Non Applicable (N/A)

10) Seriez-vous prêt à payer un billet d'avion un peu plus cher et favoriser la protection de l'environnement ?



oui, j'aime ma planète	<b>84</b>	55%
non, les billets sont déjà trop chers	<b>66</b>	43%

Donc l'hypothèse trois est validée. On assiste à un réveil des consciences. Les gens sont prêts à payer pour protéger l'environnement, alors que ce n'était pas leur préoccupation principale il y a encore quelques années.

## **Conclusion :**

Suite aux arguments développés dans les deux premières parties de ce mémoire, et au vu des résultats explicités dans la troisième partie, il ne fait plus de doute que le bio-kérosène sera amené à supplanter le jet-A conventionnel d'ici quelques années. A l'heure actuelle, les constructeurs aériens fabriquent des moteurs hybrides, encouragés par les nouvelles normes économiques et politiques. Nous sommes dans un réel réveil des consciences en ce qui concerne la protection environnementale.

De nouvelles énergies vertes sont découvertes tous les ans. Qu'il s'agisse d'algues, d'éthanol, ou encore de méthane, tous ces carburants finissent par se retrouver dans les réacteurs d'avions. Du reste le prochain avion de ligne prévu est en construction est un avion supersonique qui volera à base de méthane liquide.

Néanmoins, il persiste des obstacles technico-économiques que les entreprises doivent franchir. Les biocarburants, c'est utile pour la protection de l'environnement, mais est-il éthique de dédier les agros-carburants à l'aéronautique plutôt qu'aux populations ?

En conclusion de ce mémoire, il est incontestable que l'industrie aéronautique possède de nombreux avantages dans le secteur des biocarburants de 2<sup>ème</sup> génération. Elle peut donc établir une stratégie durable en ce qui concerne la recherche d'énergie verte, dans un monde économiquement difficile. Bien qu'elle soit conquérante de cette technologie, l'aéronautique ne doit pas oublier ce qu'elle produit ! Pour cela elle doit s'assurer pouvoir vendre ce qu'elle produit, donc vendre à la fois ses avions, mais aussi son carburant, et non pas s'orienter seulement vers le développement de carburant vert C'est pourquoi les constructeurs veillent à travailler sur les modifications de voilure, et de fuselage également.

Pour ce faire, elles savent innover et prendre des risques. Enfin, il est très utile de jouer avec les différentes sources d'énergie. Le bio-kérosène, ne pourra pas faire voler à lui seul des appareils, ni satisfaire la demande énergétique en croissance constante. Il faut donc compléter cette technologie à l'aide d'autres énergies renouvelables telles que le solaire ou l'éolien.

## **Ouverture :**

Airbus vient de confirmer les premiers vols commerciaux à l'aide de biocarburants se sont effectués avec succès.

Le Constructeur européen Airbus a confirmé que JetBlue a été la première compagnie aérienne à tester un mélange de biocarburant à bord d'un appareil A320. Les essais précédents

avaient été concluants à bord des gros appareils tels que les Boeings 747 ou 777. Maintenant l'équipementier aéronautique équipe ses avions courts courriers de moteurs adaptés au biocarburant.

Le géant européen estime que 30 pour cent des besoins en carburant pourraient être satisfaits par des biocarburants d'ici 2030.

## ANNEXES

## **A) Fiche d'entretien :**

Ci-dessous, voici le contenu des entretiens passé avec quatre professionnels du secteur aérien : un ministre des transports, deux pilotes chez Air France, et un ingénieur.

### 1) L'industrie aéronautique est-elle organisée pour faire face à l'avènement d'un carburant hybride entre le Jet A conventionnel et le Bio-Kérosène ?

Les analystes considèrent qu'environ 8 000 avions commerciaux voleront sans kérosène conventionnel dans les vingt prochaines années. A ce chiffre, s'ajoute une cinquantaine d'avion prototypes. On peut penser aussi qu'une appréciation du prix du pétrole accélèrera le processus de création d'un nouveau carburant.

Cette activité est émergente. L'industrie aéronautique et l'industrie du recyclage environnemental sont en train de s'organiser pour traiter cette activité nouvelle selon des normes bien précises.

### 2) La place de plus en plus importante occupée par les défis environnementaux, ne constitue-t-elle pas un défis technologique pour les futurs appareils ?

Les défis environnementaux, comme on le sait, prennent une place de plus en plus importante dans la construction des moteurs.

Le secteur aéronautique est un secteur qui a toujours été empreint d'exigences drastiques en ce qui concerne les innovations et les recherches technologiques. La volonté de réduire l'empreinte écologique du secteur aérien s'inscrit bien sur dans une politique de défis environnementaux.

Pour créer de nouveaux appareils toujours plus propres, moins bruyants et plus économique en consommation de carburant, les industries aéronautiques se tournent vers les hautes technologies. Elles préparent ainsi une rupture technologique grâce à de nouvelles voies de recherches telles que l'aérodynamique avancée, le domaine acoustique, les concepts de motorisation, etc.

Grâce à ces recherches, de nombreux efforts ont été porté à la fois sur la motorisation des appareils, et la masse et la forme des avions ; par ailleurs la gestion des différentes phases de vol a été nettement optimisée. Enfin la consommation de Carburant, exprimée en kg/km/passager, a été réduite pratiquement de 5 depuis les années quatre-vingt.

### 3) Dans quelles proportions les moteurs d'avions sont-ils devenus plus respectueux de l'environnement ?

Il faut savoir tout d'abord que le secteur aéronautique pollue beaucoup moins qu'on ne le pense. Il émet seulement 2% du CO<sub>2</sub> (dioxyde de carbone) diffusé à travers le monde. Du

moins jusqu'à aujourd'hui... Selon les prévisions des Nations Unies, il se pourrait bien que ce pourcentage augmente vers 3 voire 3.5%. Ces données paraissent faibles comme ça, mais en réalité c'est assez préoccupant et il faut y faire attention. En plus le dioxyde de carbone n'est pas l'unique gaz à effet de serre qui est émis par l'aviation. Il y a d'autres substances toxiques telles que le NOx, ou les chemtrails.

Donc depuis une dizaine d'années les sociétés aéronautiques doivent trouver des solutions afin de répondre le mieux possible au défi environnemental. Ces solutions commencent à émerger. De nombreuses pistes sont exploitées : il y a bien sûr les carburants alternatifs, mais il y a également des recherches en cours sur une possibilité d'allègement des fuselages, sur l'aérodynamique, et enfin sur la conception de nouveaux moteurs moins énergivores. Les gros équipementiers aéronautiques dépensent 80 % de leurs moyens financiers en Recherche & Développement, afin de minimiser encore plus les impacts environnementaux. De nos jours, les appareils sont 75 % plus performants sur le domaine énergétique, et 80 % plus silencieux qu'il y a quarante-cinq ans, soit 20 % qu'il y a dix ans !

#### 4) L'intégration des biocarburants dans les réacteurs d'avions apparaît comme une piste de progrès. Qu'est-ce que cela peut induire au niveau de la conception ?

On a réussi à obtenir du biocarburant grâce à la modification du mécanisme de photosynthèse. Cette dernière n'est plus réalisée par le soleil, mais est faite à l'aide de bactéries. Les chercheurs ont réussi, grâce à ces bactéries, à fabriquer de l'hydrogène gazeux à partir de végétaux. Nous pouvons donc transformer ces micro-organismes en usines qui permettent de créer du bio-kérosène.

Les explications techniques que l'on fournit pour le moment sont en faibles quantités car il s'agit d'une innovation en cours de développement. On se contente juste de parler d'un carburant non fossile, dit de seconde génération.

Mais maintenant, les équipementiers font attention à chercher des sources de biocarburant de qualité. Ainsi chaque plante ou algue n'est pas toujours bonne à utiliser. Par ailleurs, il faut avoir à l'esprit que lors de la conception de carburants alternatifs, il faut étudier plusieurs facteurs importants : les facteurs écologiques, certes, mais aussi énergétiques : il ne faut pas que le biocarburant supplante les cultures destinées à la population.

Je n'ose pas imaginer ce qui pourrait se passer si notre système agricole devait produire du carburant à l'ensemble des avions de ligne de la planète. Déjà rien que la flotte Air France a utilisé 3 milliards de litres de kérosène conventionnel, soit environ 2,360 millions de tonnes de biomasse aquatique. Disons qu'on atteigne en moyenne un rendement de 1 à 1,3 tonne tous les 10 km<sup>2</sup> cultivé en ce qui concerne les biomasses à base d'huiles : les surfaces agricoles nécessaires seraient démesurées.

Au stade actuel des recherches, nous en sommes au même niveau que dans le secteur de l'automobile : il faut incorporer une quantité minimale de bio-kérosène, la majeure partie étant Jet-A classique.

5) Quel est le taux de bio-kérosène maximum admissible au sein d'un mélange de carburant pour avions ?

Certains avions de ligne commerciaux commencent déjà à voler grâce aux biocarburants. D'ici quelques mois, l'industrie aérienne se sera débarrassée de son image de source majeure de pollution mondiale.

Ainsi, plusieurs compagnies aériennes telles que KLM, ou Singapore Airlines ont annoncé des prévisions de vols qui utilisent 50% de bio-kérosène et 50% de jet-a.

Je pense que le régime mixte 50-50 est le maximum admissible. Au-delà, il faudrait produire du biocarburant en trop grosse quantité pour non seulement nourrir la planète, et faire voler les avions.

Suite au roundtable on sustainable oil palm, il y a eu une approbation finale en ce qui concerne l'utilisation commerciale du bio-kérosène. Les moteurs doivent contenir un mélange maximum de 50% carburant jet-A, et 50% de bio-kérosène. Ces mélanges ne sont pas donnés par hasard, ils proviennent des normes de certifications du corps ASTM International. D'un point de vue du rendement, ce mélange 50:50 réduit jusqu'à 60% le gaz à effet de serre.

6) Faut-il augmenter massivement la production de biocarburant pour permettre d'enrayer la consommation de pétrole dans les transports ?

On se heurte ici à un problème de ressources. Les biocarburants ne sont pas des énergies fossiles, mais ils consomment des ressources limitées de notre planète : la production agricole, ainsi que les terres et l'eau nécessaires pour cette production. Ainsi, on estime que les 3% de la consommation mondiale de pétrole représentés par la production de biocarburant en 2010 ont utilisé 30 millions d'hectares de terres arables, soit 1.6% des terres arables du monde entier.

Si l'on veut augmenter la production de biocarburants, cela passera nécessairement par une expansion des terres agricoles nécessaires à cette production. Mais le potentiel de cette expansion est limité, d'une part par nos besoins alimentaires, qui vont augmenter avec la croissance démographique, d'autre part par les surfaces disponibles sans mordre sur des écosystèmes naturels. Dans tous les cas le potentiel en termes de volume avec les technologies actuelles sont limités. Si l'on affectait l'intégralité de la production mondiale d'huile végétale (130 millions de tonnes par an) à la production de biodiesel, on obtiendrait seulement l'équivalent de 7% de la consommation de pétrole dans le transport.

Pour répondre à nos besoins énergétiques, il faudra dans tous les cas utiliser des ressources qui sont en quantité finie, que ce soit les énergies fossiles ou les terres agricoles. La première priorité doit donc être de réduire nos besoins en énergie, par le biais de politiques d'efficacité énergétique par exemple. La deuxième chose à examiner est la meilleure allocation que nous pouvons faire de nos ressources pour la production d'énergie. Dans le cas des terres arables, la production d'énergie peut se faire de différentes manières : culture de biocarburant, voire

installations de panneau solaires. Des études tendent à montrer que c'est le troisième usage qui produit la plus grande quantité d'énergie à l'hectare.

#### 7) Il n'y a pas assez de terres agricoles pour produire des biocarburants et nourrir la planète.

Avec l'augmentation de la population mondiale et la généralisation de régimes alimentaires plus riches en viande dans les pays émergents, la production alimentaire va devoir augmenter fortement.

Pour loger cette production supplémentaire, il faudra des terres agricoles. Ces dernières représentent aujourd'hui environ 1 600 million d'hectares, soit 16% de la surface de notre planète. 2% de ces terres sont occupées pour la production de biocarburants.

Que se passera-t-il alors lorsqu'il faudra étendre cette surface ? Y aura-t-il la place à la fois pour répondre à une demande alimentaire grandissante et pour produire des biocarburants ?

Historiquement, la surface agricole n'a pas été proportionnelle à la production alimentaire, grâce à l'augmentation régulière des rendements à l'hectare. Mais les années 2008-2010 ont été marquées par des prix exceptionnellement élevés

## **B) Professionnels rencontrés :**

a) Monsieur Mariani, secrétaire d'état chargé du transport. Rencontré le lundi 14 novembre 2011.

b) Monsieur Piccard, pilote suisse et ingénieur. Rencontré le mercredi 28 Septembre 2011.

c) Monsieur Tixier, ingénieur aéronautique. Rencontré le Jeudi 13 octobre 2011.

d) Monsieur Apolin, commandant de bord chez Air France, rencontré le 24 Juin 2011.

## GLOSSAIRE

**Bio-Kérosène** : Combustible utilisé dans l'aéronautique, fabriqué grâce à la décomposition de la biomasse (Algues, végétaux...)

**Biomasse** : c'est l'ensemble des organismes vivants qui permettent de produire de l'énergie réutilisable

**Combustibles fossiles (ou énergie fossiles)**: ce sont les combustibles formés par des processus naturels suite à la mort d'organismes. Ces combustibles contiennent un pourcentage élevé de carbone, de pétrole et de gaz naturel.

**Craquage thermique** : Le fait de faire chauffer du pétrole afin de le fractionner en une infinité de petites molécules, et ainsi d'améliorer ses propriétés.

**Jatropha** : Il s'agit d'une d'arbustes qui poussent dans les zones arides. L'huile de Jatropha est l'huile végétale produite à partir des graines du Jatropha. On l'utilise comme biodiesel tant dans l'automobile que dans l'aéronautique

**Jet-A1** : Il s'agit du carburant utilisé principalement dans l'aéronautique. C'est un synonyme du Kérosène. Il est constitué à base de plomb

## **Bibliographie :**

### **A) Ouvrages et Rapports:**

- 1) *Algae-based biofuels: A Review of Challenges and Opportunities for Developing Countries*, GBEP 2009
- 2) *Alternate Fuelled Aircraft*, Dave Daggett, 2008
- 3) – CGI, « *Energies fossiles. Les hydrocarbures* », Editions Technip, 1980
- 4) Cuisinier D, *Energie et transport: deux révolutions indispensables*, L'Harmattan, 2005
- 5) Ariane de Dominicis, *Les Biocarburants*, Idée reçues, 2011
- 6) *Evaluation of Bio-Derived Synthetic Paraffinic Kerosenes*, Juin 2009
- 7) – Galland Y., Roy G., *Révolution aéronautique, le défis de l'environnement* Pearson Education, 2008
- 8) - Heinberg R, *Pétrole : la Fête Est Finie !*, Paris, édition Demi-lune, 2008
- 9) - De Marignan AL, *Des carburants plus verts pour l'aéronautique*, IFP Energies nouvelles, 2011
- 10) - Mathis P, *Quel avenir pour les biocarburants ?*, Edition les petites pommes du savoir, 2007
- 11) – Wihbey PM, *Le nouvel ordre du pétrole*, Academy & Finance, 2010.
- 12) - Rapport Xerfi-INSEE, *Aéronautique et Spatial*, 2010

## **B) Sitographie:**

<http://www.caradisiac.com/A380-Airbus-succes-d-un-vol-test-effectue-par-un-avion-civil-utilisant-du-GTL-3088.htm>

<http://www.enerzine.com/6/7837/impression-breve.html>

<http://aviondufutur.e-monsite.com/rubrique,les-biocarburants,134324.html>

[http://www.heliogreen.net/content/view/220/17/lang,fr/:](http://www.heliogreen.net/content/view/220/17/lang,fr/)

[http://energiesdelamer.blogspot.com/2008/09/production-de-bio-krosne-partir-dalgues.html:](http://energiesdelamer.blogspot.com/2008/09/production-de-bio-krosne-partir-dalgues.html)

Ce site explique la création et la culture des algues dans le but d'en faire du carburant.

[http://www.consoglobe.com/ac-transports-propres\\_3983\\_transport-bio-kerosene.html](http://www.consoglobe.com/ac-transports-propres_3983_transport-bio-kerosene.html)

: Cette page annonce l'introduction du bio kérosène dans le milieu de l'aéronautique. Sur l'exemple de la voiture biodiesel, on cerne mieux comment on peut pousser l'innovation jusqu'au marché aérien.

[http://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/environnement-securite-energie-thematique\\_191/un-biocarburant-pour-l-aviation-commerciale-article\\_4618/:](http://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/environnement-securite-energie-thematique_191/un-biocarburant-pour-l-aviation-commerciale-article_4618/)

Ce site dédié surtout aux ingénieurs met en scène la réutilisation d'un kérosène déjà existant afin de lui apporter quelques modifications : ajout d'huile à base de plantes et d'algues. Par ailleurs, on découvre les potentielles utilisations de ces nouveaux kérosènes.

[http://www.greenetvert.fr/site/?p=3582:](http://www.greenetvert.fr/site/?p=3582) cette page nous entraîne dans les secrets brésiliens : en effet le bio-kérosène serait une invention brésilienne, repris ensuite par la Nasa et Boeing.

[http://www.nnfcc.co.uk/metadot/index.pl?id=0:](http://www.nnfcc.co.uk/metadot/index.pl?id=0) Ce site britannique traite des potentiels remplaçants du kérosène.

## **C) Bases de données :**

Factiva, Xerfi, Diane.

Ecole de Management Léonard de Vinci  
Mémoire de recherche

Sujet du mémoire : La gestion Les énergies renouvelables dans le secteur aéronautique : une question stratégique et un enjeu de gestion aéronautique

Auteur : Matthieu GOUDINEAU

Responsable du mémoire : Mme Rhita Bouazzaoui

Année de réalisation : 4<sup>ème</sup> Année

Document Intermédiaire de Recherche 3

Résumé du mémoire :

Après des décennies de progrès, le secteur aéronautique aborde une nouvelle ère : celle du bio-kérosène. Depuis les années 2010, on assiste à une introduction progressive de biocarburant au sein du marché aéronautique civil.

Mais l'exploitation de ce biocombustible n'est pas si simple. Elle doit être accompagnée de nombreuses modifications dans la production et l'exploitation des appareils, mais aussi dans la gestion de la logistique aéroportuaire.

Mots clés :

Bio-kérosène, Aéronautique, gestion des innovations, biocarburant, combustibles, sources d'énergie

Je soussigné \_\_\_\_\_, responsable du mémoire, donne un avis :

favorable -  défavorable à la mise à disposition au public d'une copie de ce mémoire en salle de documentation.

Signature :

Date :

Je soussigné **Matthieu GOUDINEAU**, rédacteur du mémoire, autorise l'EMLV à conserver une copie de ce mémoire accessible en salle de documentation et certifie qu'il ne contient aucune donnée à caractère confidentiel.

Signature :

Date : 5 Juin 2011