

UNIVERSITE D'AIX-MARSEILLE
FACULTE DE DROIT ET DE SCIENCE POLITIQUE

POLE TRANSPORTS
INSTITUT DE FORMATION UNIVERSITAIRE ET DE RECHERCHE DU TRANSPORT
AERIEN (IFURTA)

**« LE PLAN D'ACTION DE L'INDUSTRIE AERONAUTIQUE
: EN REPONSE AUX ENJEUX CLIMATIQUES »**

Mémoire pour l'obtention du
Master 2 Droit et Management du transport aérien

par

Dina HABACH

Sous la direction de Mme Julie LABORDE DIT BOURIAT, CODIRECTRICE
DE L'IFURTA

Année universitaire 2020-2021

UNIVERSITE D'AIX-MARSEILLE
FACULTE DE DROIT ET DE SCIENCE POLITIQUE

POLE TRANSPORTS
INSTITUT DE FORMATION UNIVERSITAIRE ET DE RECHERCHE DU TRANSPORT
AERIEN (IFURTA)

**« LE PLAN D’ACTION DE L’INDUSTRIE
AERONAUTIQUE : EN REPONSE AUX ENJEUX
CLIMATIQUES »**

Mémoire pour l’obtention du
Master 2 Droit et Management du transport aérien

par

Dina HABACH

Sous la direction de Mme Julie LABORDE DIT BOURIAT, CODIRECTRICE
DE L’IFURTA

Année universitaire 2020-2021

« Ce qui importe, ce n'est pas d'arriver, mais d'aller vers. »

- **Antoine de Saint Exupéry, écrivain, poète, aviateur**

« Les espèces qui survivent ne sont pas les espèces les plus fortes, ni les plus intelligentes, mais celles qui s'adaptent le mieux aux changements »

- **Charles Darwin, naturaliste et paléontologue**

REMERCIEMENTS

En préambule à ce mémoire, je souhaiterais adresser mes remerciements à :

Madame LABORDE DIT BOURIAT Julie, directrice de mon mémoire, pour sa disponibilité et ses précieux conseils, ainsi que pour son soutien et pour avoir mis ses contacts à ma disposition pour la préparation de ce mémoire.

Je tiens également à remercier toutes les personnes avec qui j'ai eu l'honneur de m'entretenir pour recueillir leurs témoignages qui ont enrichi ma vision de ce sujet :

Monsieur GANDON Florian, étudiant à Science-PO Paris et Isae-aéro, Lauréat du prix des Usaire Student Awards 2020, pour sa gentillesse et son expertise.
Monsieur BARA Jean-Marc, lors du séminaire traitant du développement durable dispensé à l'IFURTA.

L'ensemble des professeurs et intervenants pour la richesse de leur enseignement et de leur intervention.

Enfin, j'aimerais remercier ma famille, mes proches pour leur aimable relecture.

SOMMAIRE

Remerciements.....	6
Sommaire.....	7
Tables des abréviations et des sigles utilisés.....	8
Introduction.....	10
Partie 1 : Les évolutions technologiques et opérationnelles de l'industrie aéronautique face à un carburant historique en crise : le kérosène.....	16
Titre 1 : L'avenir du kérosène face à l'augmentation du trafic aérien.....	17
Chapitre 1 : Une augmentation croissante du trafic aérien incompatible avec l'utilisation à long terme du kérosène.....	17
Chapitre 2 : La montée en puissance de mouvements anti-avion en raison de l'impact écologique du transport aérien.....	25
Titre 2 : Des progrès technologiques et opérationnels de l'industrie aéronautique en réponse aux différents objectifs internationaux, jugés insuffisants.....	32
Chapitre 1 : La réglementation des émissions CO2 du transport aérien.....	32
Chapitre 2 : Pistes de recherche et avancées technologiques et opérationnels aéronautiques..... ;	37
Partie 2 : Vers un avion réellement décarbonné par l'utilisation de biocarburants aéronautiques.....	53
Titre 1 : Les biocarburants aéronautiques.....	54
Chapitre 1 : La production et l'utilisation des carburants durables alternatifs.....	54
Chapitre 2 : Les différentes contraintes.....	67
Titre 2 : Les différents enjeux des biocarburants aéronautiques.....	73
Chapitre 1 : Les enjeux pré-production.....	73
Chapitre 2 : Les enjeux post-production.....	79
Conclusion.....	83
Bibliographie.....	85
Table des matières.....	92
Résumé.....	96

ABRÉVIATIONS ET SIGLES UTILISÉS

ADP	Aéroports De Paris
AESA	Agence Européenne de la Sécurité Aérienne
APU	Auxiliary Power Unit
ASTM	American Society for Testing Material
ATAG	Air Transport Action Group
ATJ	Alcohol-To-Jet
ATM	Air Traffic Management
CAEP	Committee on Aviation Environmental Protection
CCNUCC	Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques
CDO	Continuous Descent Operations
CHJ	Catalytic Hydrothermolysis Jet fuel
CITEPA	Centre Interprofessionnel Technique d'Études de la Pollution Atmosphérique
CONOPS	Concept of Operations
CORAC	Conseil pour la Recherche Aéronautique Civile
CORSIA	Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation
DGAC	Direction Générale de l'Aviation Civile
DSHC	Direct Sugar to HydroCarbons
DSNA	Direction des Services de la Navigation Aérienne
EGTS	Electric Green Taxiing System
ETSO	European Technical Standard Order
GES	Gaz à Effet de Serre
HEFA	Hydroprocessed Esters and Fatty Acids
HHC	Biological derived Hydrocarbons from algae
IATA	International Air Transport Association
ISCC	International Sustainability and Carbon Certification

NATS	National Air Traffic Services
OACI	Organisation de l'Aviation Civile Internationale
ONG	Organisation Non Gouvernementale
ONU	Organisation des Nations Unies
PEID	Petits États Insulaires en Développement
PKTep	Passagers équivalents Km Transportés
RISE	Revolutionary Innovation for Sustainable Engines
RSB	Roundtable for Sustainable Biomaterials
RTK	Revenue Tonnes Kilometers
SAF	Sustainable Aviation Fuel
SARPs	Standards And Recommended Practices
SESAR	Single European Sky Atm Research
TARMAAC	Traitements et Analyses des Rejets émis dans l'Atmosphère par l'Aviation Civile
TIRIB	Taxe Incitative Relative à l'Incorporation de Biocarburants
UE	Union Européenne

INTRODUCTION

§1. Contexte & Actualité

Le transport aérien est le mode de transport le plus rapide au monde et le plus intéressant en termes de gain de temps, il est indéniable qu'il est irremplaçable sur les longues distances. D'autant plus, il constitue un maillon essentiel au développement économique et culturel. Malgré ses nombreux avantages, il revêt un caractère assez contraignant et pas des moindres : il est peu écologique. En effet, le transport aérien est régulièrement pointé du doigt pour ses impacts négatifs sur l'environnement. La lutte contre le réchauffement climatique représente un des défis des plus importants pour l'aviation.

Pour tenter d'atténuer ses effets indésirables sur le climat, le secteur aérien particulièrement exposé, a lui aussi entamé sa nécessaire transition écologique. La croissance continue du trafic aérien génère d'amples inquiétudes dans un contexte actuel fragilisé par la crise sanitaire de la Covid-19. C'est dans cette perspective que s'engage, depuis des années, l'industrie aéronautique avec des projets et des objectifs ambitieux.

A chaque session de l'Assemblée de l'Organisation de l'Aviation Civile Internationale (OACI) de nouvelles résolutions, reflétant la détermination des États Membres de l'OACI à fournir un soutien continu à l'aviation civile internationale pour limiter ou réduire au maximum ses émissions contribuant au réchauffement climatique mondiale, sont adoptées.

Pour atteindre ces objectifs mondiaux une approche globale, consistant en un panier de mesures a été identifié, à savoir : le développement de technologies liées aux aéronefs, l'amélioration de la gestion du trafic aérien et de l'utilisation des infrastructures et enfin l'utilisation de carburants alternatifs.

§2. Objectifs et limites

Ce mémoire n'a pas pour but d'être technique en matière de nouvelles technologies, ou encore de biocarburants aéronautiques. Son objectif consiste à faire un tour d'horizon des différents moyens mis en place par l'industrie aéronautique afin de lutter contre le dérèglement climatique. Et surtout de souligner le fait que, bien que des technologies innovantes et révolutionnaires aient été proposées par l'industrie aéronautique afin de réduire la consommation de carburant, elles se sont avérées insuffisantes.

L'urgence de se détacher de la dépendance aux produits carbonés d'origine fossile, par l'utilisation de carburant d'aviation durable apparaît comme la seule solution à court terme efficace à la réduction des émissions de CO₂ aériennes.

Ne seront pas traités les autres émissions générées par l'activité aérienne (telles que les nuisances sonores par exemple), l'avion à hydrogène ainsi que l'avion électrique du fait de leur caractère encore à présent hypothétique.

§3. Définitions des termes clés

Pour bien comprendre les tenants et les aboutissants de ce mémoire, il convient de définir les termes clés que l'on va y retrouver.

a) Définition du terme innovation ou avancée technologique

La première notion à définir est celle d'innovation ou d'avancée technologique. Elle peut se définir comme l'ensemble de processus qui permet de créer ou d'améliorer l'aspect technique d'un produit. L'avancée technologique est fondée et repose sur un travail de recherche visant à repenser la structure même du produit voire son mode de production. L'innovation est à la base du progrès humain.

b) Définition du terme biocarburant

La deuxième notion à définir est celle de biocarburant, connu également sous le nom de carburant vert, bio-kérosène ou encore Sustainable Aviation Fuel (SAF). Un biocarburant se définit comme : « un *carburant obtenu à partir de végétaux cultivés ou de leurs déchets, de lisiers, de boues d'épuration, etc., et qui peut être utilisé comme additif ou substitué aux carburants pétroliers.* »¹.

De cette définition ressort directement deux des majeurs enjeux de la production des biocarburants, à savoir la ressource mais aussi la substitution ou l'addition au carburant pétrolier, en l'occurrence au kérosène, c'est ce que l'on appelle le concept de drop-in. Ces aspects seront traités dans la partie 2 du présent mémoire.

c) Définition du terme gaz à effet de serre (GES)

La troisième notion à définir est celle des gaz à effet de serre.

Les gaz à effet de serre sont des gaz « *d'origine naturelle (vapeur d'eau) ou anthropique (liée aux activités humaines) absorbant et réémettant une partie des rayons solaires (rayonnement infrarouge), phénomènes à l'origine de l'effet de serre. Les principaux gaz à effet de serre (GES) liés aux activités humaines sont le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄), l'oxyde nitreux ou protoxyde d'azote (N₂O) et des gaz fluorés : hydrofluorocarbure (HFC), perfluorocarbure (PFC), hexafluorure de soufre (SF₆) et le trifluorure d'azote (NF₃).* »²

Le gaz à effet de serre qui nous intéresse dans le présent mémoire est le dioxyde de carbone (formule moléculaire : CO₂). Ce gaz est provoqué par divers

¹ <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/biocarburant/9386>

² <https://www.insee.fr/fr/metadonnees/definition/c1855>

processus de combustion, en l'espèce c'est à travers le prisme des émissions aériennes que nous allons l'étudier.

§4. Histoire de l'aéronautique et de ses progrès

Du premier cerf-volant au premier vol commercial des siècles se sont écoulés. Alors qu'un peuple de pêcheurs et de navigateurs des îles d'Asie du Sud-Est ont inventés le cerf-volant au 4^e siècle avant Jésus-Christ. Les chinois en ont fait une utilisation militaire, puisqu'ils leur servaient de signal, d'outil pour mesurer les distances, envoyer des messages ou encore d'outil de dissuasion les ennemis d'attaquer. S'en est ensuivi le premier vol de montgolfière en 1783, accueillant à son bord un mouton un coq et un canard. Les frères Joseph et Etienne de Montgolfier, ont ainsi évoquer l'un des plus vieux rêves de l'homme : s'élever et voler librement dans les airs, comme un oiseau. Depuis la légende d'Icare et jusqu'à l'envol du premier ballon à air chaud, l'homme a fait preuve de beaucoup d'imagination.

Notamment avec le véritable tournant, en 1903 avec le premier vol motorisé des frères Wright. Six années plus tard, c'est Louis Blériot qui à son tour réalise l'exploit de traverser la Manche. Et ce n'est que dès 1914 que les premiers vols commerciaux furent leurs apparitions.

§5. Histoire des biocarburants

Un carburant d'origine végétale ? L'idée n'est pas nouvelle ; bien qu'elle fût initialement pensée pour le secteur automobile. En effet, l'inventeur du moteur à explosion, Nikolaus Otto, avait conçu son moteur pour qu'il fonctionne avec de l'éthanol, produit par gazéification de produits carbonés, et plus spécifiquement de bois.

Et ce n'est effectivement pas le seul inventeur à avoir songer à recourir à un carburant d'origine végétale. En effet, quelques années plus tard, Rudolf Diesel

inventeur du moteur Diesel, faisait fonctionner son invention à l'huile d'arachide. La Ford T quant à elle roulait au bioéthanol.

Malheureusement, ces biocarburants ont été mis de côté lorsque le pétrole était moins cher et semblait inépuisable. Ce n'est que suite aux divers chocs pétroliers, au réchauffement climatique, que l'on a reconsidéré leur sort.³

§6. Annonce de plan

De nos jours, l'industrie aéronautique fait face à une nouvelle révolution : celle de la neutralité environnementale.

Dans une première partie, nous verrons que face à la pression de l'impact de l'utilisation du kérosène et des nombreuses réglementations afférentes aux émissions rejetées par la combustion du carburant, tous les acteurs de l'industrie aéronautique se sont mobilisés pour faire évoluer la situation. Il s'agit donc d'établir un état des lieux des différentes innovations en réponse aux exigences internationales de plus en plus exigeantes et oppressantes pour le secteur aérien. Puis dans une seconde partie, nous démontrerons que l'utilisation des biocarburants aéronautiques reste l'unique levier pouvant faire la différence.

³ <https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/enjeux-et-prospective/decryptages/energies-renouvelables/quel-avenir-les-biocarburants>

Partie 1 : Les évolutions technologiques et opérationnelles de l'industrie aéronautique face à un carburant historique en crise : le kérosène

Le kérosène, également connu sous le nom de carburéacteur ou jet fuel, est un carburant utilisé dans l'aviation pour alimenter les turboréacteurs et les turbopropulseurs. Historiquement, le jet A1 est le kérosène le plus employé de l'aviation. Bon marché et très efficace, il a toujours été le premier choix des aviateurs. Toutefois, ce carburant est peu écologique. Il se heurte donc à la houle de critiques concernant les émissions de CO₂ liées à l'activité aérienne. D'autant plus que son avenir est mis en péril en raison de l'augmentation exponentielle du trafic aérien (**Titre 1**). Néanmoins face à l'urgence climatique, les différentes parties prenantes de l'aviation s'efforcent à élaborer un plan d'action visant à réduire les émissions CO₂. En effet, c'est par le biais de nouvelles avancées technologiques et opérationnelles que l'industrie aéronautique (**Titre 2**) entend dans un premier temps verdir l'avion. Ces mesures seront-elles suffisantes ? sont-elles des mesures réalisables à court terme ? le secteur aérien réussira-t-il à relever le défi ambitieux de la neutralité carbone ? Quels sont les mesures complémentaires que l'on peut apporter à ces révolutions technologiques ?

Ces questionnements font l'objet de notre étude en cette première partie.

Titre 1 : L'avenir du kérosène face à l'augmentation du trafic aérien

La croissance marquée du trafic aérien fait planer le doute quant à la durabilité de l'utilisation du kérosène en tant que carburant conventionnel (**Chapitre 1**). Le contexte climatique actuel cristallise énormément de débats face à l'urgence générée par le réchauffement atmosphérique et engendre une montée en puissance de mouvements anti-avion (**Chapitre 2**) alimentés par une ambition de verdir les politiques.

Chapitre 1 : Une augmentation croissante du trafic aérien incompatible avec l'utilisation à long terme du kérosène

Exempt de taxe, le kérosène est l'un des rares carburants jusqu'à présent à échapper à cette contrainte fiscale. Néanmoins au vu de l'augmentation exponentielle du trafic aérien au fil des années (**Section 1**), le kérosène ne semble plus être éligible à une exonération quelconque de taxation. (**Section 2**).

Section 1 : L'augmentation du trafic aérien justifiée par différents facteurs

Depuis des années, le décuplement croissant du trafic aérien (A) trouve sa source à travers plusieurs facteurs (B).

A. Une augmentation croissante du trafic aérien constatée

Depuis les années 1970, le trafic aérien, calculé en passager-kilomètre, a connu une augmentation exponentielle et régulièrement, et plus précisément ce dernier double tous les 15 ans.



Source : Airbus

En 2019, le nombre de passagers s'élevait à 4.5 milliards à travers le monde, soit 66% de plus qu'en 2020⁴. Avant, la crise sanitaire International Air Transport Association (IATA) avait estimé qu'il pourrait bien doubler, d'ici 2037, pour atteindre huit milliards. En réalité, le secteur aérien est en pleine expansion et il n'est pas près de s'arrêter.

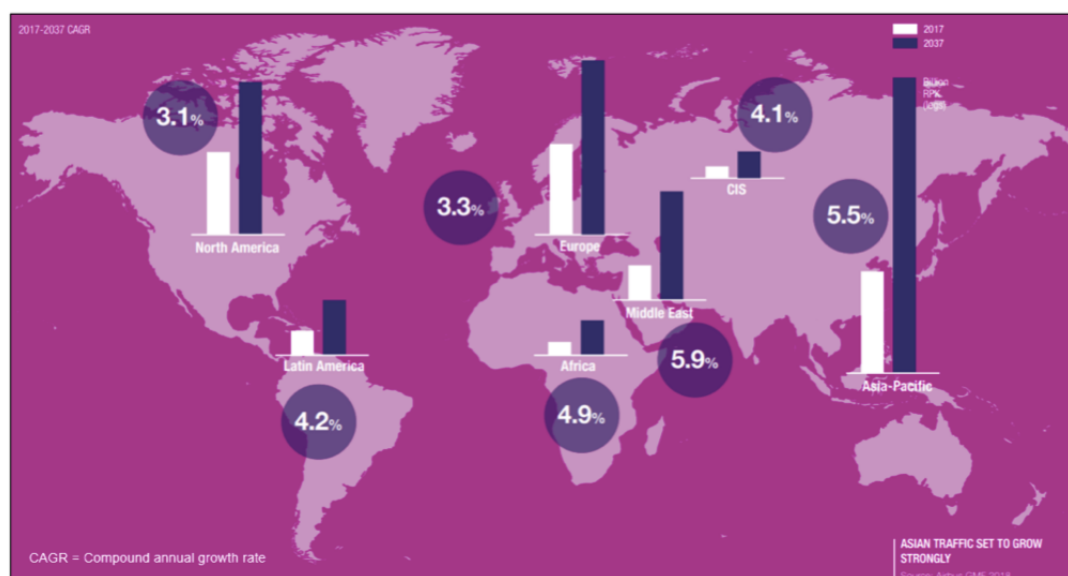
B. Les causes et facteurs explicatifs de l'augmentation croissante du trafic aérien

Cette augmentation continue peut trouver son explication à travers **plusieurs facteurs**.

Tout d'abord avec la **montée en puissance et le développement des pays émergents**. Prenons pour exemple le marché asiatique, qui depuis quelques années avec l'augmentation de la population et la classe moyenne est un marché très prometteur. Comme l'indique l'illustration, Airbus, après une étude de marché, émet des estimations du taux de croissance annuel du marché aérien

⁴ <https://www.iata.org/contentassets/98e73eed8f0642089447f885f8e06e3b/2020-11-24-01-fr.pdf>

entre 2017 et 2037. Toutefois la limite de cette carte est sa date, en effet elle a été créée en 2018 soit avant la crise de la Covid-19, ce qui fausse ces estimations.

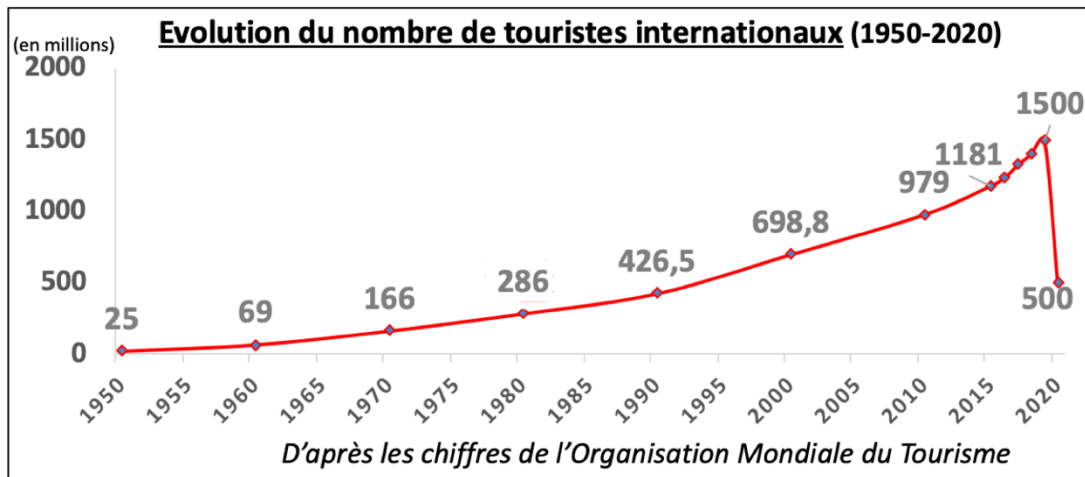


Source : Airbus, 2018

Ajoutons à cela, la **diminution des prix des billets d'avion** par le développement de compagnies aériennes Ultra Low Cost ou Low Cost, telles que Ryanair ou Easyjet, qui proposent par l'achat d'un billet, que le transport d'un point A à un point B, exempt de services. Il n'est pas sans savoir que le prix des billets d'avion a diminué d'environ 60% depuis les années 1970 avec la libéralisation et la déréglementation. En réponse à cela, le yield management (*c'est une pratique commerciale qui consiste à faire varier les prix en fonction du comportement de la demande des consommateurs*⁵) des autres compagnies concurrentes a dû être revu à la baisse.

Un autre facteur et pas des moindre est **l'augmentation du tourisme**. Depuis les années 50, la quantité de touristes internationaux a explosé. En 70 ans, le nombre de touristes internationaux est passé de 25 millions à 1500 millions soit 60 fois plus en proportion.

⁵ <https://www.inc-conso.fr/content/le-yield-management-quest-ce-que-cest>



Source : Organisation Mondiale du Tourisme

En somme, tous ces facteurs ont contribué et contribuent encore à l'augmentation annuelle du trafic aérien. Néanmoins, cette croissance rime avec émissions de gaz à effet de serre mais ne rime pas avec les gains d'efficacité énergétique prévisibles, d'où la nécessité d'étudier le carburéacteur utilisé par les avions, source première des émissions de CO₂ : le carburéacteur.

Section 2 : L'utilisation du kérosène : entre présent et avenir

Avant d'envisager l'avenir du kérosène et son éventuelle taxation (B), il conviendrait tout d'abord de définir celui-ci (A).

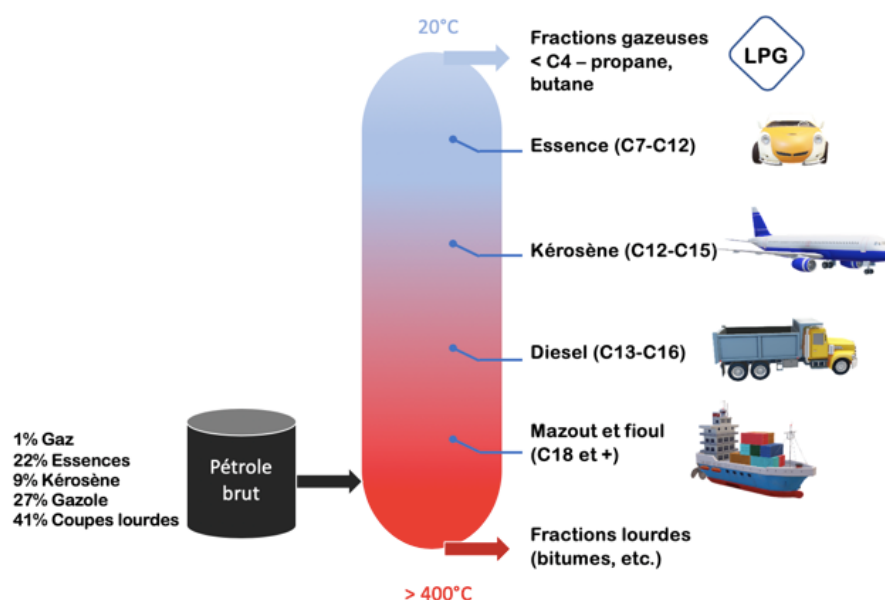
A. Qu'est-ce que le kérosène ?

L'aviation utilise depuis toujours un carburant liquide certifié internationalement : le jet fuel ou plus communément appelé kérosène.

Comment est produit le kérosène ?

Les carburants sont produits à partir du pétrole brut, qui est un mélange d'espèces chimiques dites hydrocarbures. Afin d'obtenir du carburant, il faut

séparer les différentes espèces chimiques. Chaque hydrocarbure pur a des caractéristiques différentes et spécifiques. Le raffinage consiste donc à utiliser lesdites caractéristiques de chaque composant d'un mélange pour les séparer et extraire ce que l'on appelle les fractions. La première distillation se fait dans une colonne de plusieurs plateaux perforés à clapets permettant une distillation fractionnée. On envoie ainsi le pétrole brut dans un four de distillation et dans la colonne on récupère différentes coupes ou différentes fractions. Chaque fraction du pétrole a une utilisation spécifique.



Source : <http://www.chem4us.be/environnement/carburants/>

Le Kérosène, ou jet fuel, est un mélange d'hydrocarbures contenant des alcanes allant de $C_{10}H_{22}$ à $C_{14}H_{30}$ ⁶. Issu du raffinage du pétrole et résultant du soutirage pendant la distillation entre 150° C et 250° C.⁷

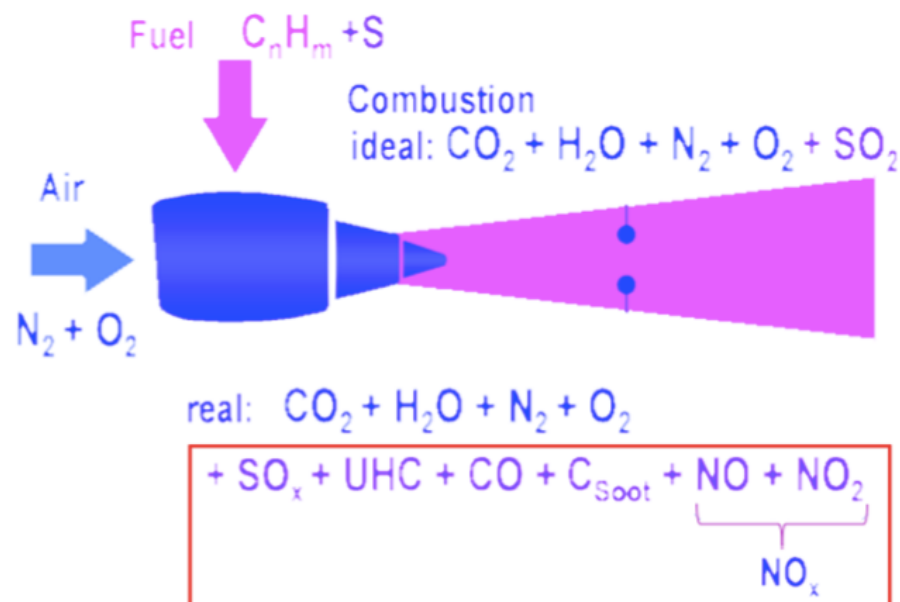
L'usage du kérosène comme carburant aéronautique est justifié par son fort pouvoir énergétique.

⁶ <https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Kerosene.html>

⁷ <https://youtu.be/YhdQ4LiJRkI>

Le problème est que la combustion de carburant et plus précisément du kérosène, produit différents types de composants indésirables polluant l'air tel que :

- dioxyde de carbone (CO_2)
- de l'eau (H_2O),
- du monoxyde de carbone (CO)
- des oxydes d'azote (NO_x)
- des oxydes de soufre (SO_x)
- des particules en suspension comme la suie et les sulfates.



Source : STAC, 2019

Ainsi, l'aviation impacte l'environnement de différentes manières (pollution de l'air, pollution sonore etc) mais surtout à différente échelle : à l'échelle locale, régionale et mondiale.

Dès lors, une solution est apparue...et pourquoi pas taxer le kérosène ?

B. La taxation du kérosène au cœur des propositions de la Commission Européenne

Le kérosène n'est pas soumis à la directive européenne sur la taxation de l'énergie (permettant aux pays de taxer le kérosène nationalement). En réalité, cette exonération fiscale date de la convention de Chicago de 1944. Néanmoins, le kérosène n'échappera peut-être plus à cette taxation avec le nouveau projet de proposition de loi de la Commission Européenne. “ *La proposition imposerait un niveau de taxe minimal au sein de l'UE. À partir de 2023, la taxe minimale pour le carburant d'aviation commencerait à zéro et augmenterait progressivement sur une période de 10 ans, jusqu'à ce que le taux plein soit imposé. Le projet de proposition ne précise pas quel serait le taux final*”.

Toutefois, cela représente un défi monstre : les modifications des taux d'imposition de l'Union Européenne (UE) supposent à l'unanimité l'approbation des 27 pays membres de l'UE, ce qui signifie qu'un seul État pourrait y opposer son veto.⁸ Bien que la Belgique, le Luxembourg et l'Autriche soient de fervents défenseurs de cette idée. Ils avancent même : “*que la taxe européenne sur le kérosène favoriserait l'innovation et la concurrence loyale dans l'UE. Si l'UE ne parvenait pas à se mettre d'accord sur une approche commune, ils iraient probablement de l'avant avec l'adoption de législations nationales, notant que cela entraverait le marché unique.*”⁹

Mais quels seraient les réels revers de cette taxation ?

- Une concurrence déloyale entre compagnies européennes et compagnies étrangères
- Une hausse significative des billets
- La disparition de certains vols
- La baisse significative des passagers

⁸ <https://www.lecho.be/entreprises/aviation/la-commission-europeenne-envisage-de-taxer-le-kerosene/10317908.html>

⁹ <https://www.euractiv.fr/section/plan-te/news/la-taxe-europeenne-sur-le-kerosene-pourrait-rapporter-5-milliards-deuros-aux-etats-membres/>

Ce n'est sans surprise que IATA quant à elle semble s'opposer radicalement à cette mesure et déclare : « *L'aviation est engagée sur la voie de la décarbonation et n'a pas besoin de mesures punitives comme les taxes pour changer* ».

De tous ces propos, de nombreuses questions en découlent :

- Faut-il privilégier le défi climatique (alors que d'autres mesures sont déjà prises afin d'y répondre) ou la viabilité de certaines compagnies aériennes ?
- Pourquoi taxer le kérosène maintenant ? enjeux politiques ?
- Ne serait-ce pas le début de la mise à mort du trafic aérien déjà anéanti par la crise de la Covid-19 ?
- L'avion deviendra-t-il un mode de transport élitiste ?

Chapitre 2 : La montée en puissance de mouvements anti-avion en raison de l'impact écologique du transport aérien

Le transport aérien a souvent été la cible des mouvements écologistes, entre les chiffres avancés par les pro-avion et les anti-avion, la bataille est colossale. Alors que les arguments des écolos sont essentiellement tournés vers le chiffre de la contribution au réchauffement climatique du transport aérien, les pro-avion ne manquent pas de rappeler la place et le rôle crucial de l'aviation dans notre société. Des simples chiffres d'émissions permettent-ils réellement de trancher le débat ? la réponse semble évidemment négative, tout chiffre peut-être analyser différemment selon le prisme utilisé. Il conviendrait donc dans un premier temps d'étudier les émissions du transport aérien à différentes échelles (**Section 1**) et dans un second temps les différents mouvements de révoltes qui se sont levés suite à la prise de conscience liée à ces émissions (**Section 2**).

Section 1 : Les émissions du transport aérien à différentes échelles

Il est important d'étudier les émissions du transport aérien à l'échelle nationale (A) mais également à de plus grandes échelles c'est-à-dire européenne et mondiale (B) afin de réellement analyser l'impact écologique de l'avion.

A. Les émissions CO₂ du transport aérien à l'échelle française

Depuis des années, la Direction Générale de l'Aviation Civile (DGAC) est très impliquée dans la lutte contre les émissions imputables à l'activité aérienne. Pour calculer cela, elle utilise un outil spécifique appelé « **TARMAAC** » (Traitements et Analyses des Rejets émis dans l'Atmosphère par l'Aviation Civile), développé en coopération avec le **CITEPA** (Centre Interprofessionnel Technique d'Études de la Pollution Atmosphérique). Il permet de quantifier les

émissions selon le type de moteur, d'avion, la liaison (origine-destination), le temps de roulage mais également d'autres paramètres. La DGAC a également mis à disposition de tout citoyen un outil appelé « **Ecolocal** » permettant à chaque passager de connaître les émissions liées à son vol.

A l'échelle française, en 2018 les émissions de CO₂ de l'aviation civile s'élèvent à 22.7 millions de tonnes dont 79.1% de ces émissions sont liés aux vols internationaux soit les vols long-courriers.

Le CITEPA, organisme qui rapporte les émissions, affirme qu'en 2017, en France le secteur aérien représentait 1.4% des émissions CO₂ et 3.7% de celles du secteur des transports.¹⁰

Selon le rapport 2019 de la DGAC,¹¹ *« les émissions de CO₂ pour le transport aérien en France se sont élevées à 23,4 Mt (millions de tonnes) ; elles sont en progression de +2,6% par rapport à 2018, le trafic ayant progressé de +3,0% en passagers-équivalents et de +2,6% en passagers-équivalents-km-transportés (PKTeq) ».*

« Avec 4,8 Mt en 2019, la part du transport intérieur dans les émissions de CO₂ du transport aérien est de 20,5%, dont une proportion importante liée à la desserte Métropole/Outre-mer (2,7 Mt). Depuis 2000, les émissions de CO₂ pour le trafic intérieur métropole sont en nette diminution (-27%) » ;

« Les émissions du transport aérien international 2019 (18,5 Mt de CO₂) représentent 79,5% des émissions du transport aérien France, en progression de +40% par rapport à 2000, pour un trafic à +79% (en PKTeq) ».

B. Les émissions CO₂ du transport aérien à l'échelle européenne et mondiale

➤ Émission au niveau mondial

L'aviation internationale correspond environ à 2% voire 3% des émissions mondiales.

¹⁰ Webinaire : les biocarburants aéronautiques

¹¹ https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/bilan_emissions_gazeuses_2019.pdf

➤ **Le secteur aérien et la crise de la Covid-19 (prisme européen)**

Le secteur aérien est sans conteste le secteur d'activité le plus touché par la crise de la Covid-19. En effet, l'effondrement du transport aérien a été signé par la fermeture des frontières. IATA énonce même que « *La crise de la COVID-19 est un défi à la survie même de l'industrie. Les livres d'histoire vont inscrire l'année 2020 comme la pire année financière de l'industrie, sans exception. Les compagnies aériennes réduisent leurs dépenses d'un milliard de dollars par jour en moyenne durant 2020, et elles vont tout de même enregistrer des pertes sans précédent.* »¹²

La Covid-19 a réalisé ce que lobbyistes, ingénieurs et d'autres acteurs n'arrivaient pas à atteindre : une réduction effective des émissions CO₂.

Selon Eurocontrol, entre janvier et novembre 2020, les émissions de CO₂ produites par le transport aérien ont baissé de 56,7 % quand le trafic plongeait de 54 %.¹³

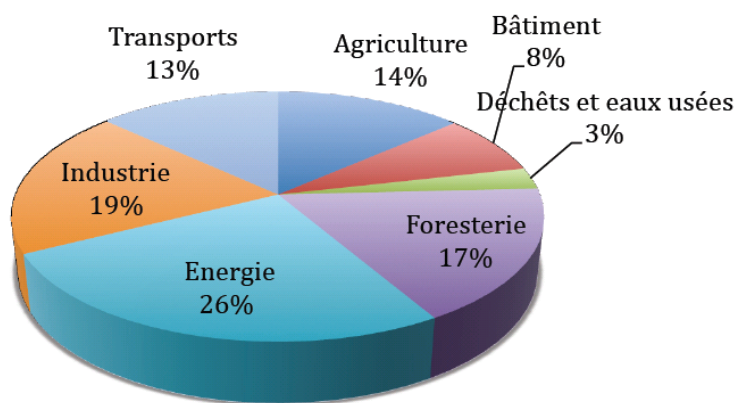
➤ **Part d'émissions de différents secteurs**

Pourquoi les transports et plus particulièrement le transport aérien est-il continuellement pointé du doigt lorsque de nombreux autres secteurs sont beaucoup plus polluants ?

A titre d'exemple le secteur industriel représente plus de 19% soit 6% de plus que le secteur des transports.

¹² <https://www.iata.org/contentassets/98e73eed8f0642089447f885f8e06e3b/2020-11-24-01-fr.pdf>

¹³ <https://www.20minutes.fr/planete/2944643-20210104-emissions-co2-transport-aerien-suivi-effondrement-traffic-2020>



Source : Séminaire IFURTA 2020

Ou encore prenons l'exemple du train, qui est un autre mode de transport, faisant l'objet de plus d'éloges que le transport aérien. Il est même envisagé que certaines lignes aériennes soient remplacées par des voies ferroviaires suite à la Convention Citoyenne sur le Climat. Mais quelle est la réalité cachée derrière un mode de transport soi-disant plus écologique ?

A vrai dire, il est intéressant de voir à travers ce document publié par la SNCF que le bilan carbone des projets de constructions de lignes n'est pas très élogieux quant à lui, et contrairement à ce que l'on peut penser la construction d'une ligne est très émettrice en GES.

RÉSULTAT DES BILANS CARBONE DES PROJETS DE LIGNE NOUVELLE								
PROJET	LONGUEUR (lignes, raccor-dements)	COÛT (M€)			ÉMISSIONS DE GES (BILAN CARBONE*)			
		Total	dont financé par SNCF Réseau	dont financé par les Green Bonds 2016	milliers de tCO ₂ eq	milliers de tCO ₂ eq par km	tCO ₂ eq par M€ Investi	milliers de tCO ₂ eq allouées aux Green Bonds 2016
	A	B	C	D	E	F=E/A	G=E/B	H=D*G
Est 2	L : 107 km R : 9 km	2 191	580	14	1 049	9	479	7
BPL	L : 182 km R : 32 km	3 380	1 435	53	1 350	6	400	20
SEA	L : 302 km R : 38 km	7 546	2 098	73	1 671	5	221	16
CNM	L : 60 km R : 20 km	2 291	465	36	621	8	271	10
Total	L : 651 km R : 99 km	15 408	4 578	176	4 691	6	304	54

Sources : Bilans Carbone® des projets établis par les maîtres d'ouvrage sur leurs périmètres respectifs.
 - Est 2 : tableau de calcul établi par EcoAct pour SNCF Réseau (2017).
 - BPL : BC final établi par ERE (2017) et échanges complémentaires.
 - SEA : BC établi par USEA (2017) sur le périmètre de la concession (hors raccordements) : 1,485 MtCO₂eq.
 Hypothèse que le bilan carbone par km des raccordements est égal à celui de la ligne.
 - CNM : BC établi par Oc'via (2017).

Source : SNCF

Ces chiffres, dès lors qu'ils ont été publiés, ont fait l'objet de plusieurs révoltes.

Section 2 : Le développement de mouvement anti-avion

Suivant de près l'appel au boycott de l'avion initialement lancé par le mouvement de flight shame (A) en Suède, de nombreuses ONG françaises (B) se sont inscrites dans le même dynamisme afin de verdir les politiques.

A. Le développement du Flight shame

Communément appelé le « *flight shame* » en anglais, « *flygskam* » en suédois, ou encore « *la honte de prendre l'avion* » en français ce mouvement apparu en Suède en 2018, peu après l'accord de Paris, fait l'objet d'une médiatisation hors du commun.

Les militants de ce mouvement sont préoccupés par l'impact du transport aérien sur l'environnement et encouragent les gens à éviter autant que cela est possible l'usage de la voie aérienne pour se déplacer. Un mouvement qui inquiète les compagnies aériennes mais également IATA. En effet, Alexandre de Juniac, Directeur général de l'IATA a déclaré en 2019 : « *c'est une grande menace. Le secteur du transport aérien est confronté à un risque de réputation. C'est une première.* »

En effet, l'égérie écolo suédoise Greta Thunberg, ne cesse d'attirer l'attention sur l'insuffisance des actions en faveur du climat. Depuis 2016, elle a pris la ferme décision de ne plus voyager en avion.

Pour montrer l'exemple, elle n'a pas hésité à mettre à exécution ses dires.

Quelques jours avant le sommet de l'Organisation des Nations Unies (ONU) sur le climat en date du 23 septembre 2019, elle s'est rendue accompagnée de son père à New York en voilier zéro carbone depuis Plymouth. Ce parcours de 3000 miles nautiques a été effectué en 2 semaines.

Le rendu est-il moins polluant ?

La réponse semble être négative puisque les 5 membres d'équipage se sont rendus en avion à New York pour ramener le bateau. Sans compter, le skipper Boris Herrmann, qui doit quant à lui prendre l'avion au retour.

Compte rendu ? 6 billets contre 2 si Greta et son père avaient opté pour l'avion.

B. Le développement de mouvement écolos à l'échelle française

D'un **point de vue local**, de nombreuses Organisations Non Gouvernementales (ONG) françaises telles que le Réseau action climat, Greenpeace France, On est prêt, France nature environnement, Citoyens pour le climat, I-boycott, Oui au train de nuit se sont réunis en lançant la campagne notre choix, visant essentiellement à mobiliser le grand public sur les enjeux environnementaux liées à l'aviation. Ces organisations avancent comme principal argument que l'avion reste le mode de transport le plus polluant.

Plus récemment, en mars 2021, les militants de Green Peace ont partiellement repeint en vert un avion Air France stationné à l'aéroport Paris-Charles de Gaulle à Roissy.



Source : Sud Ouest, 2021

En faisant cela, ils ont émis leurs souhaits d'illustrer le « *greenwashing* », c'est-à-dire l'utilisation trompeuse d'arguments faisant état de bonnes pratiques écologiques. En effet, c'est suite aux débats parlementaires sur le projet « loi climat et résilience » que les activistes de Greenpeace se sont introduits sur le tarmac afin d'exposer leur mécontentement concernant les mesures proposées par ce projet, qu'ils jugent selon eux insuffisants à endiguer la crise climatique. Selon leurs dires, l'extension d'aéroports sera toujours possible ; la suppression des vols courts lorsqu'il y a une alternative en train de 2 heures 30 maximum n'aura pas de réel impact, il aurait fallu supprimer les vols pour lesquels une alternative en train de 6 heures existe. De surcroît, selon eux, le projet de loi est insuffisant sur les enjeux de fiscalité du secteur aérien.

La contribution du secteur aérien au dérèglement climatique connaît une forte croissance et nécessite l'intervention des grandes institutions du transport aérien. Bien que ce secteur ne constitue qu'une part infime des émissions de CO₂, l'urgence climatique ne saura se faire attendre. C'est pour cela, que l'IATA, l'ATAG et l'OACI ont su fixer des objectifs permettant à l'industrie aéronautique d'actionner leur plan de décarbonation progressive de l'avion.

Titre 2 : Des progrès technologiques et opérationnels de l'industrie aéronautique, en réponse aux différents objectifs internationaux, jugés insuffisants

Au vu de l'augmentation croissante du trafic aérien et des émissions de CO₂ afférentes, les grandes institutions de l'aviation internationale ont fixé des objectifs à atteindre afin d'atténuer les émissions CO₂ liées à l'activité aérienne (**Chapitre 1**). Face à ces nouvelles restrictions, l'industrie aéronautique, dans son ensemble, a développé un plan d'action visant à améliorer les technologies et optimiser les opérations (**Chapitre 2**). Encore faut-il que ces avancées soient suffisantes...

Chapitre 1 : La réglementation des émissions CO₂ du transport aérien

Face à la crise climatique, le transport aérien est dans l'obligation de se mobiliser afin de réduire son empreinte carbone et garantir ainsi son développement de manière durable. L'OACI, quelques années plus tard, dans un même objectif adopte avec son programme CORSIA (**Section 2**) des engagements ambitieux déjà relativement avancés par l'IATA et l'ATAG (**Section 1**).

Section 1 : L'engagement IATA/ATAG

En 2009, IATA et ATAG (Air Transport Action Group) réunissant les compagnies aériennes, les aéroports, les constructeurs ainsi que les services de la navigation aérienne ont proposé à l'échelle mondiale de s'engager à la

réduction des émissions de l'aviation par la mise en place des objectifs suivants :

- d'ici à 2020, amélioration de la consommation passager/km de 1.5% par an
- à compter de 2020 : carbon neutral growth par la compensation intégrale de la croissance du trafic aérien
- horizon 2050, une réduction des émissions CO2 de 50% par rapport au niveau de 2005.

Quelques années plus tard c'est au tour de l'OACI de proposer un nouveau panier de mesures s'inscrivant dans une même perspective de réduction d'émissions CO2.

Section 2 : Le programme CORSIA

En 2016, l'OACI a adopté un dispositif à l'échelle internationale intitulé CORSIA (A), dans lequel la France est pleinement impliquée (B).

A. Feuille de route et objectifs du programme CORSIA

Depuis la fin des années 90, par le biais du protocole de Kyoto, la Convention cadre des nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC) délègue à l'OACI la compétence de mener à bien toute négociation afin de limiter ou réduire les émissions de GES pour le transport aérien international. L'accord de Paris (COP21 en 2015) va dans ce même sens et ne contredit donc pas cette délégation de compétence. Le principal levier de l'OACI est le CAEP (Committee on Aviation Environmental Protection) composé d'experts en matière d'environnement ayant pour principale mission : l'assistance du conseil de l'OACI dans la formulation de nouvelles politiques et normes environnementales (SARPs). Il entreprend également des études spécifiques sous la demande du Conseil. Les domaines qu'il couvre sont le bruit, les émissions, le changement climatique et l'adaptation. Ce comité est divisé en plusieurs groupes. Le groupe de travail 4 du CAEP traite des questions

technique concernant la mise en œuvre du système de compensation et de réduction des émissions de carbone pour l'aviation internationale (CORSIA : Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation). En effet, en 2016, l'OACI a adopté ce dispositif à l'échelle internationale. Il prévoit que les compagnies aériennes sont dans l'obligation d'acheter des unités d'émissions de CO2 dit "crédits carbone" générées par la réduction des émissions dans d'autres secteurs de l'industrie ou de l'agriculture. Depuis le 1^{er} janvier 2021, les 88 États volontaires participant à la phase pilote représentent environ 80% de l'activité aérienne mondiale.

A la fin de la mise en œuvre complète du dispositif il est estimé que cela devrait représenter une baisse d'émissions de CO2 équivalente aux émissions de 140 millions de voitures. D'autant plus qu'il s'agit d'un tournant historique, car le secteur aérien est le premier secteur économique à se doter d'une norme mondiale de certification des émissions de CO2.

Quelle est la réelle portée de ce programme ?

- Contraindre les constructeurs à adapter leurs flottes aux technologies les plus récentes et avancées en termes d'efficacité énergétique
- Contraindre les compagnies aériennes à remplacer les appareils les plus anciens

Quelles sont les différentes phases de mise en œuvre du programme CORSIA ?

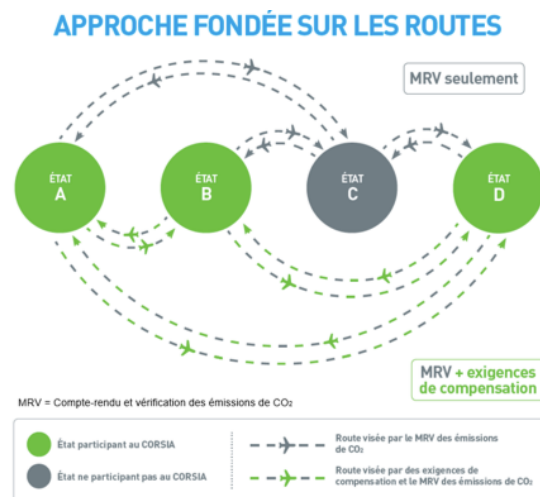


Source : OACI

La phase pilote et la première phase s'appliqueront aux États qui se sont portés volontaires pour participer. La deuxième phase quant à elle s'appliquera à tous les États dont la part individuelle des activités aériennes internationales dont les RTK (Revenue Tonnes Kilomètres) en 2018 est supérieur à 0.5% du total des RTK ou dont la part cumulée dans la liste des États, du montant le plus élevé au plus faible des RTK, atteint la barre des 90% du total. Une exception est faite aux pays les moins avancés, les Petits États insulaires en développement (PIED) et les pays en développement sans littoral, sauf s'ils se portent volontaires pour participer à cette seconde phase. En principe, dès la seconde phase près de 76% des émissions de CO₂ du trafic aérien international mondial seront couvertes.

Quels sont les vols concernés ?

Tous les vols internationaux sur les routes entre les États participants. Les vols entre un État participant et un État non participant quant à eux sont exclus de cette mesure de compensation.



B. Le programme CORSIA en France

Quid du programme CORSIA en France ?

La DGAC est l'autorité qui s'assure du fonctionnement de CORSIA pour la France. En mars 2020, les compagnies aériennes françaises ont déclaré leurs émissions pour la première fois, dont les services de l'État s'assurent de la vérification.

De plus, la France est pleinement engagée et accompagne plus de 20 États dans la mise en œuvre du programme CORSIA dans le cadre d'un nouveau programme de coopération dit "ACT-CORSIA" (Assistance, Capacity-building and Training) de l'OACI.

Toutefois avec la crise sanitaire de la Covid-19, en découle une forte baisse de la référence des émissions de CORSIA, initialement définie comme moyenne des émissions 2019/2020. C'est pour cela que l'OACI, a provisoirement considéré uniquement les émissions de l'année 2019 pour la référence CORSIA.

En vue de répondre à ces nouvelles exigences, l'industrie aéronautique a développé de nouvelles pistes de recherches visant à améliorer les technologies ainsi que les opérations aériennes. Certaines de ces pistes ont même trouvé leur aboutissement dans de grands projets menés par un panel diversifié d'acteurs.

Chapitre 2 : Pistes de recherche et avancées technologiques et opérationnels aéronautiques

Au cours de ces dernières années, l'industrie aéronautique a été confrontée à une nécessaire adaptation aux enjeux du développement durable. Tous les acteurs de l'aviation se sont ainsi mobilisés afin de réduire leur empreinte carbone dans un premier temps et dans un second temps atteindre la neutralité carbone sur le long terme.

C'est pour cela, que toute la chaîne aéronautique, le modèle économique a été repensé. Afin de répondre à la feuille de route fixée par l'OACI, une révolution technologique est vite apparue comme la seule solution à court terme. Cette implication du secteur aérien se fait autour de 3 grands axes : le design de l'aéronef (**Section 1**), les opérations (**Section 2**), et enfin l'usage des carburants durables.

Il est à noter que d'énormes progrès ont eu lieu depuis la production des premiers avions commerciaux. Selon le rapport d'Airbus, environ 10 millions de tonnes de CO₂ évitée depuis 1990, et depuis les années 1960, les émissions de CO₂ ont été réduite de 80% par siège/kilomètre¹⁴.

Section 1 : Innover et repenser le design aéronef

Plusieurs leviers peuvent contribuer à améliorer et rendre plus performant un avion telles que la réduction de la masse avion (A) ou encore l'optimisation des moteurs et de la forme de ce dernier (B) afin qu'il soit plus écologique.

A. La réduction de la masse de l'avion

¹⁴ Rapport : « Environment matters for the futur of aerospace » – Airbus

Le poids est un facteur essentiel car il est directement lié à la consommation de carburant. Réduire le poids permet de réduire l'énergie nécessaire au vol. Historiquement, les alliages étaient en aluminium, ils ont laissé place à des matériaux composites pour la fabrication des fuselages avions.

- **Réduction des sièges : la révolution de la société ExpliSeat**

Expliseat, est une compagnie française qui a conçu le siège pour avion le plus léger du monde. Ce siège a obtenu l'agrément ETSO (European Technical Standard Order) de l'AESA (Agence Européenne de la Sécurité Aérienne), certifiant qu'il respecte les normes de sécurité fixées par l'Union Européenne.

Après de multiples tests et contrôles, le **Titanium Seat** est habilité à voler à bord des compagnies aériennes. Malgré son faible poids de 5 Kg/6 kg, le Titanium Seat est un véritable compromis entre exigence de sécurité, robustesse, design, confort et économie. Cela permet une réduction de consommation de carburant équivalent allant jusqu'à 500.000 dollars par avion et par an¹⁵.



Source : ExpliSeat

¹⁵ <https://expliseat.com/tiseat/>

Quelques pistes de recherche :

- L'utilisation de matériaux composites (déjà fréquent pour les avions récents) peut être étendue au niveau des structures ou aux trains d'atterrissage.
- L'utilisation de matériaux composites "tièdes" ou à matrice céramique envisagée dans certaines zones chaudes des moteurs et leurs environnement (nacelle et mât)
- L'utilisation des matériaux thermoplastiques (à la place des thermodurcissables) ce qui permet de réduire le nombre de pièces élémentaires et de fixations.
- L'utilisation de la fibre optique ou du multiplexage pour réduire la masse du câblage nécessaire au transport de données à l'intérieur des avions

B. L'optimisation du moteur et de la forme de l'avion

- **Optimiser la forme de l'avion pour réduire la résistance de l'air :**

Quelques pistes de recherche :

- Augmentation de l'envergure des ailes (difficulté : cette voilure doit rester efficace et contrôlable dans toutes les phases de vol).
- Intégrer les trains principaux dans le fuselage plutôt que dans les ailes

- **Recourir à de nouveaux moteurs :**

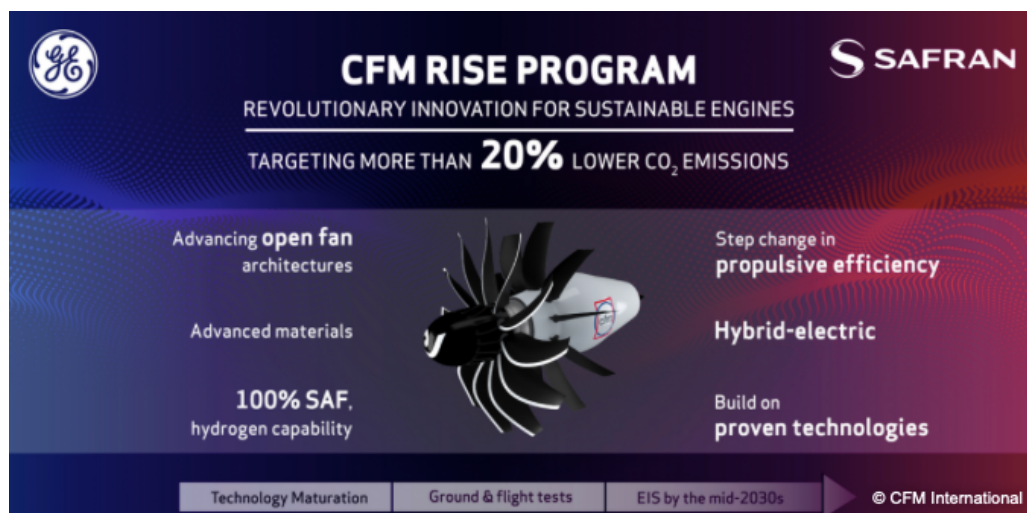
Par le développement de nouveaux moteurs, les fabricants peuvent également réduire significativement la consommation de carburant.

Quelques pistes de recherches :

- Moteurs à soufflante de très grand diamètre pour maximiser le débit du flux secondaire.
- Moteurs ayant un corps haute pression petit mais à fort taux de compression pour extraire un maximum d'énergie de flux primaire.

○ **Projet RISE (Revolutionary Innovation for Sustainable Engines)**

Safran/general electric:



Source : CFM International

Les industriels Général Electric et Safran ont récemment annoncé le lancement des premiers travaux de recherche et développement sur un moteur capable de fonctionner à l'hydrogène ou avec 100% de biocarburants¹⁶. Ce moteur pourrait réduire plus de 20% de la consommation de carburant et d'émissions de CO₂ comparé à un moteur actuel. Les ingénieurs ont pour ambition d'assurer un moteur d'une efficacité propulsive maximale, grâce à une architecture non carénée. Une mise sur le marché est prévue vers 2035.

¹⁶ <https://www.air-cosmos.com/article/cfmi-lance-le-programme-rise-24997>

Section 2 : La mise en place de programmes d'optimisation des opérations aériennes

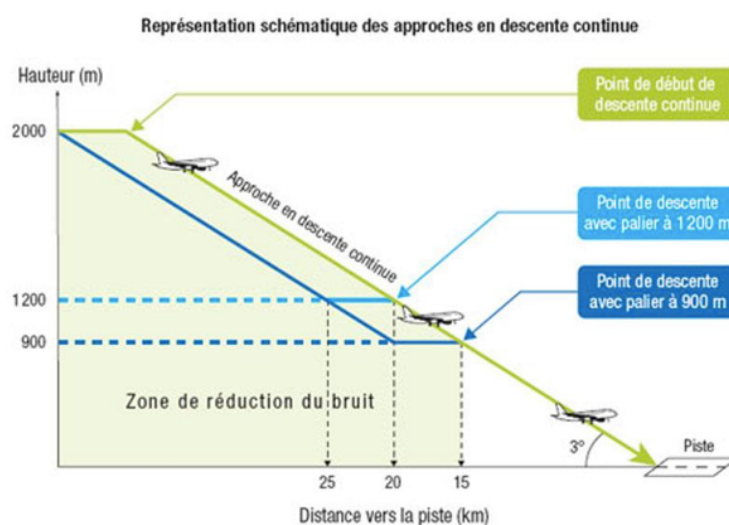
L'optimisation des opérations en vol (A) et au sol (B) constitue également un levier important quant à la consommation de carburant et la réduction de l'impact environnemental de toute activité aérienne.

A. L'optimisation des opérations en vol

a) La procédure CDO

Habituellement, la phase de descente d'un avion comporte des paliers à faible altitude qui nécessite une poussée relativement importante des réacteurs et l'utilisation des becs de bord d'attaque et des volets de bord de fuite. Ce qui a tendance à générer énormément de nuisances sonores et est très gourmand en carburant. La descente continue est donc une technique de vol imaginée permettant à l'avion en approche de l'aérodrome d'éviter au maximum les phases de vol en palier permettant des bénéfices d'ordre environnemental et économique¹⁷.

Source : DGAC



¹⁷ <https://www.ecologie.gouv.fr/mise-en-oeuvre-procedures-descente-continue-sur-grands-aeroports-en-france>

b) Le Projet fello'fly d'Airbus

Ce projet, inspiré du biomimétisme, consiste à faire voler les avions comme des oiseaux sauvages pour économiser le carburant (entre 5 et 10%). En effet, il s'agirait de les faire voler en forme de V. Cela permettra à l'avion de profiter de la portance offerte par l'avion en tête de la formation.

C'est en partant du constat que chaque moteur d'aéronef produit dans son sillage un vortex contenant un courant d'air ascendant qui pourrait bénéficier à l'avion suiveur pour réduire la poussée de ses moteurs et par conséquent réduire sa consommation en carburant. En 2016, un premier vol de démonstration avec un A350 volant 3 kilomètres (distance de sécurité) derrière un A380 a permis de confirmer une économie de plus de 10% de consommation de carburant.

Néanmoins, il faut prouver la faisabilité opérationnelle de ce projet, Airbus a ainsi conclu un accord le 9 septembre 2020, avec les compagnies aériennes Scandinavian Airlines et French Bee ainsi qu'avec la DSNA (direction des services de la navigation aérienne en France, NATS (National Air Traffic Services) au Royaume Uni et Eurocontrol afin de mener une étude. A l'issue il pourra être établi un concept d'exploitation (CONOPS).

Une réelle mise en pratique peut s'envisager à horizon 2025. Et une assistance aux pilotes pour s'assurer que l'avion reste positionné à la même altitude, la même distance est en cours de recherche. Il s'agirait d'un levier supplémentaire d'action.

Source :
Airbus



c) Le projet Optilevel de Safety Line

Récemment, la start-up Safety Line a développé un nouveau dispositif permettant l'économie de 25 kg de carburant toutes les dix minutes pour les vols moyen-courriers. Pour ce faire, les pilotes disposeront d'un logiciel dit "Optilevel" conseillant des changements de niveaux, optimisant ainsi les plans de vol verticaux des avions. Optilevel indique aux pilotes l'altitude à laquelle il est le plus économique de voler (tout en intégrant les données météorologiques et les statistiques de l'appareil). Le fondateur de Safety Line, Monsieur Jouniaux est parti du constat suivant : *“ Plus un avion vole haut, moins il consomme de carburant. Il a donc, en fonction du poids de l'appareil, des niveaux optimums”*.¹⁸

Ce produit est encore en phase de test avec la compagnie Transavia, partenaire d'innovation du projet car plusieurs paramètres pas encore pris en compte doivent l'être tel que : la vitesse des vents et la température.

D'après ses concepteurs, il s'agirait d'un dispositif simple à mettre en œuvre car les calculs sont faits au sol, avec le plan de vol de dernières minutes et les données météorologiques mises à jour. De plus, Optilevel utilise également les données contenues dans les boîtes noires des avions. Et enfin, tout cet algorithme permet la constitution d'un tableau qui est envoyé directement sur la tablette des pilotes avant le décollage.

Les résultats des vols d'essais sont enthousiastes puisque Optilevel pourrait permettre une économie de 1% de carburant de croisière. Outre l'économie du carburant, cela permet la réduction des émissions de CO₂ puisque comme l'estime Pierre Jouniaux : *“Pour chaque kilogramme de kérosène consommé, on émet 3.15kg de CO₂”*. Ce dispositif pourra peut-être être étendu aux long-courriers, sur lesquels une prévision d'une réduction trois fois plus importante est espérée.

¹⁸ <https://www.industrie-techno.com/article/comment-transavia-va-reduire-sa-consommation-de-carburant-en-optimisant-l-altitude-de-ses-avions.64819>

d) Le projet SESAR (Single European Sky Atm Research)

Ce projet est le pilier technologique du ciel unique européen. Son principal objectif est d'améliorer les performances de la gestion du trafic aérien¹⁹ en modernisant et harmonisant les systèmes ATM (Air Traffic Management) à travers la **définition** (2005-2008), le **développement** (2008-2013) et le **déploiement** (2014-2020 et plus) de solutions technologiques et opérationnelles innovantes.

Le 10 juillet 2013, le programme SESAR a été prolongé officiellement jusqu'en 2024.

Key performance area	SES High-Level Goals vs. 2005	Key performance indicator	SESAR ambition vs. baseline 2012	
			Absolute saving	Relative saving
 Cost efficiency: ANS productivity	Reduce ATM services unit cost by 50% or more	- Gate-to-gate direct ANS cost per flight - Determined unit cost for en-route ANS* - Determined unit cost for terminal ANS*	EUR 290-380	30-40%
 Operational efficiency	-	- Fuel burn per flight (tonne/flight) - Flight time per flight (min/flight)	4-8 min 0.25-0.5 tonne	3-6 % 5-10 %
 Capacity	Enable 3-fold increase in ATM capacity	- Departure delay (min/dep) - En-route air traffic flow management delay* - Primary and reactionary delays all causes - Additional flights at congested airports (million) - Network throughput additional flights (million)	1-3 min 0.2-0.4 (million) 7.6-9.5 (million) Additional flights, net saving	10-30 % 5-10 % ¹ 80-100 % ²
 Environment	Enable 10 % reduction in the effects flights have on the environment	- CO₂ emissions (tonne/flight) - Horizontal flight efficiency (actual trajectory)* - Vertical efficiency - Taxi-out phase	0.79-1.6 tonne	5-10 %
 Safety	Improve safety by factor 10	Accidents with ATM contribution	No increase in accidents	Improvement by a factor 3-4
 Security	-	ATM related security incidents resulting in traffic disruptions	No increase in incidents	

* Targeted by the Performance Scheme

¹ Additional flights that can be accommodated at congested airports, representing 5-10 % of flights at congested airports (~31 % of 14,4 (million) flights in 2012).

² Additional traffic accommodated in 2015 in comparison with 2012 and associated with ANSP productivity gains, enabled by SESAR. Note: Numbers are rounded.

Source : Commission européenne, 2017

e) Le projet Pureflyt de Thalès

Jean-Paul Ebanga, Thales Vice-Président Flight Avionics énonce: « Dans les airs, la révolution digitale commence tout juste. L'électronique de bord connaît un changement de paradigme dans le contexte d'un espace aérien connecté, et PureFlyt est le seul système de gestion de vol qui fasse réellement de l'avion un

¹⁹ https://ec.europa.eu/transport/modes/air/sesar_en

nœud de connectivité. En traitant et en partageant des volumes considérables de données, PureFlyt rendra les avions plus sûrs, plus écologiques, plus faciles à piloter, plus rentables pour les compagnies aériennes et plus confortables pour les passagers. »

En effet, Thalès a développé un système de gestion de vol conçu pour une gestion efficace des aéronefs, entièrement connecté et conçu pour transmettre aux avionneurs et aux compagnies aériennes une combinaison optimale de sécurité, d'efficacité opérationnelle et d'efficacité énergétique. La trajectoire de l'avion peut donc être contrôlée, adaptée en continue, pour un vol optimisé, une plus faible consommation de carburant et plus de confort pour les passagers.²⁰

Ce programme sera disponible pour une mise sur le marché à compter de 2024.



Source : <https://actu-aero.fr/2019/12/03/thales-devoile-pureflyt-le-cerveau-de-lavion-de-demain/>

²⁰ <https://www.thalesgroup.com/fr/group/journaliste/press-release/thales-devoile-pureflyt-le-cerveau-lavion-demain-0>

B. L'optimisation des opérations au sol

a) Electric Green Taxiing System De Safran:

Après plusieurs années de recherche et de développement, Safran en partenariat avec HoneyWell relève le défi de faire rouler les avions à l'électrique.

Ce système EGTS (Electric Green Taxiing System) utilise le générateur électrique de l'APU (Auxiliary Power unit) pour alimenter des moteurs dans les roues principales, permettant aux avions de se déplacer sur les pistes sans utiliser leurs moteurs. Ce système avait été étudié avec Airbus, Boeing quant à eux n'était pas intéressé car le train d'atterrissage très condensé sur ses B737 ne permettait pas d'avoir assez de place pour installer un tel équipement.

Néanmoins ce projet a été un échec cuisant, puisque Airbus a décidé de ne pas l'installer.



Source : https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/7e/Electric_Green_Taxiing_System_-_Messier-Bugatti-Dowty_Safran_LeBourget2013_F-HGNT_2193.JPG

b) WheelTug Electric Taxi System

La société WheelTug, filiale de Borealis Exploration, développe un système de roulage électrique spécial. Il s'agit d'un système de roulage électrique dans les

roues qui permet aux avions de rouler en avant et en arrière, en utilisant de petits moteurs électriques alimentés par l'unité APU dans les roues avant plutôt que des moteurs à réaction ou un remorqueur.

Ce système a été testé pour la première fois sur un ancien Boeing d'Air Canada. Delta Air Lines avait publié un communiqué de presse en 2007, attestant de son partenariat de développement et de client de lancement pour WheelTug. En septembre 2020, le PDG de WheelTug, Isiah Cox, a déclaré que « *le système serait en production et certifié fin 2021er que WheelTug était devenu si populaire qu'il devrait être ajouté à une future version de Microsoft Flight Simulator* ».

Néanmoins, ce système se heurte à un enjeu considérable, si les compagnies aériennes essayent WheelTug cela peut rendre les anciens avions à nouveau utiles ce qui rendrait obsolète la nécessité d'achat de nouveaux avions. Argument principal évoqués par les constructeurs Airbus et Boeing qui verraient leurs chiffres baissés.



Source : <https://aviationweek.com/gallery-wheeltug-electric-taxi-system>

c) Taxibot, Israel Aerospace Industrie

Un tracteur électrique pour le push-back et le taxiing commandé depuis le cockpit à l'aide des commandes de pilotage habituelles. Ce tracteur, disposant d'un moteur hybride-électrique de 800 chevaux, peut remorquer un avion de la porte du terminal au point de décollage (phase de taxi-out) et le ramener à la porte après l'atterrissage (phase de taxi-in).

Il existe deux modèles : le taxibot narrow-body utilisé pour les avions monocouloirs et le taxibot wide-body utilisé pour les avions bicouloirs²¹.



Source : <https://www.taxibot-international.com/narrow-body-taxibot>

²¹ <https://www.taxibot-international.com/narrow-body-taxibot>



Source : <https://www.taxibot-international.com/wide-body-taxibot>

Section 3 : Le recyclage des avions

Le recyclage total des aéronefs et des pièces détachées apparaît également comme essentiel.

D'ailleurs, Tarmac Aerosave, filiale d'Airbus, Safran et Suez, créée en 2007 propose ce service sur son site de Tarbes-Lourdes-Pyrénées. Sa mission initiale était de démanteler les vieux zincs. Mais aujourd'hui comme l'affirme Patrick Lecer, PDG de Tarmac Aerosave « *Nous réussissons aujourd'hui à recycler 90% de la masse d'un appareil, pratiquement tout sauf les composites et les mousses. Personne d'autre au monde ne sait le faire* ». Bien qu'il faille compter entre quatre à six semaines pour désosser tout l'avion. Tout d'abord est extrait les équipements (trains d'atterrissage, commande de vol etc) et les moteurs. Le moteur reste indéniablement la pièce la plus précieuse. Selon Grégory Beyneix, directeur des opérations sur le site : « *ils représentent 90% de la valeur négociable.* »

Les pièces récupérées sont stockées, nettoyées, emballées, classées et enfin certifiées. A l'issue de cette certification, le propriétaire de l'aéronef revend les pièces qui vont être écouler par la suite sur le marché de l'occasion par des brokers.²²

L'objectif à terme serait d'atteindre une récupération de 100% de la masse des aéronefs. Pourquoi accroître ce taux ?

Premièrement, le nombre d'aéronefs mis hors service sera amené à croître au fil des années, et chaque aéronef regorge de matériaux précieux dont la réutilisation peut s'étendre à de nombreux secteurs.

Deuxièmement, socialement parlant, cette activité engendre de la main d'œuvre et qui dit main d'œuvre dit emplois, qu'il soit direct ou indirect.

Un autre enjeu apparaît également qui est celui de la législation concernant le recyclage des avions. Les législations devraient imposer à terme le recyclage de tous les avions.



Très rapidement, une prise de conscience sur l'insuffisance des leviers technologiques traditionnels a été relevée. En effet, les différents travaux tels que la diminution de la masse, de la traînée aérodynamique, l'efficacité des moteurs et autres, afin de réduire la consommation de carburant et par conséquent les émissions de CO₂, ne semblent pas suffire à compenser la croissance exponentielle du trafic aérien. Il en devient donc primordial de penser à une solution plus "efficace" voire "complémentaire" à ces avancées. Toutefois, il est à noter que chaque nouvelle génération apporte une

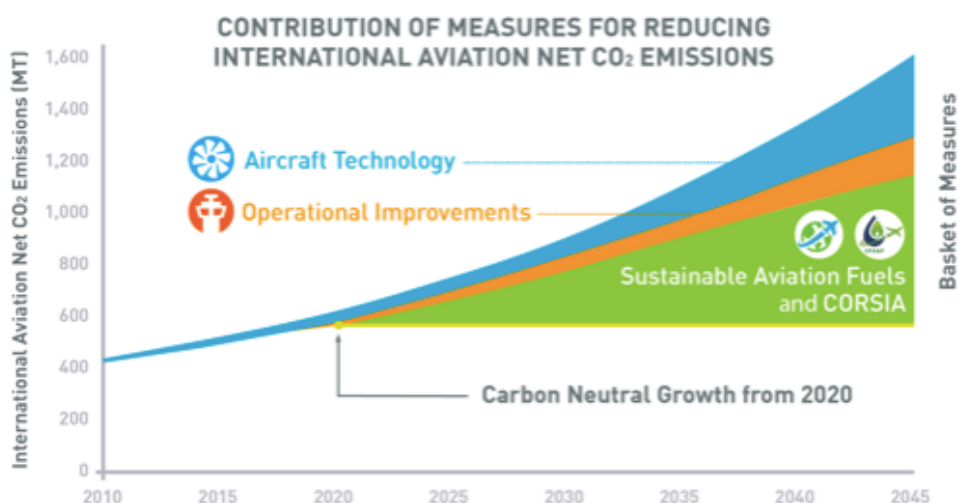
²² <https://www.capital.fr/entreprises-marches/tarmac-a-tarbes-ce-recycleur-de-gros-avions-dit-merci-a-la-crise-1380851>

amélioration de l'efficacité énergétique plus ou moins équivalente à 20% par rapport à la génération précédente.



Source : AIRBUS

Comme l'atteste ces deux documents, si le souhait est de réellement décarboner l'avion, il faut envisager un recours plus poussé aux biocarburants. Ils constituent un levier majeur afin de répondre à l'ambition climatique mondiale.



Source : OACI

PARTIE 2 : Vers un avion « réellement » décarbonné par l'utilisation de biocarburants aéronautiques

La qualité du carburant est essentielle pour le bon fonctionnement des aéronefs. Ce dernier ne sert pas que de source d'énergie, il sert également pour le refroidissement du lubrifiant, le chauffage de l'air cabine, et l'alimentation de l'APU. De cette complexité architecturale des circuits ressort un besoin crucial d'assurer la compatibilité dudit carburant avec l'ensemble des composants de l'avion. De plus, les conditions d'utilisation du kérosène sont très variables et imposent une maîtrise parfaite de ses propriétés et de leur évolution avec les contraintes externes. Ainsi, les carburants durables d'aviation portent une place stratégique pour accompagner la transition énergétique du secteur aérien mais encore faut-il qu'ils répondent à toutes ces exigences.

De surcroît, les biocarburants apparaissent comme une solution intéressante car on parle des émissions sur l'ensemble du cycle de vie (de la production jusqu'à l'utilisation du biocarburant).

Aujourd'hui, il existe une diversité de production de technologies de ces carburants durables et de ressources potentielles au taux de mélange maximaux au kérosène variable. C'est dans une perspective de diversité que s'inscrit le déploiement de filières de biocarburants aéronautiques.

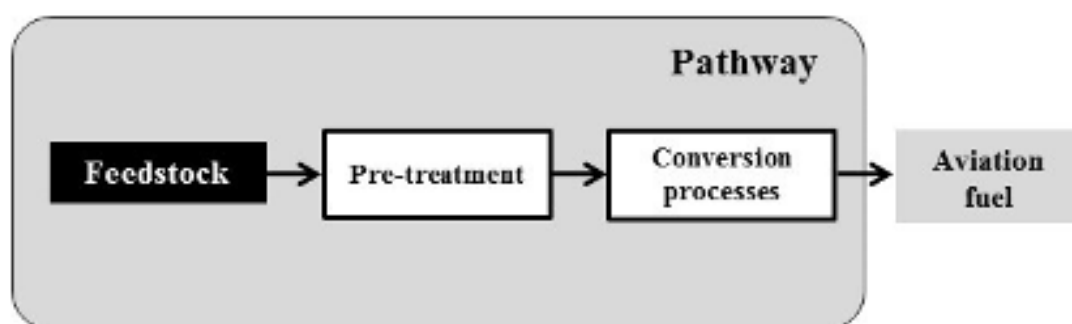
A travers cette partie, nous allons tout d'abord étudier la production, le traitement et la certification des biocarburants aéronautiques (**Titre 1**) puis exposer les différentes contraintes auxquelles ils se heurtent (**Titre 2**).

Titre 1 : Les biocarburants aéronautiques

Les biocarburants aéronautiques sont souvent assimilés à la solution miracle de neutralité carbone, leur production variée et prometteuse (**Chapitre 1**) est soutenue à différentes échelles par le biais de diverses législations (**Chapitre 2**), encore faut-il que ces dernières ne soient pas trop contraignantes pour les utilisateurs finaux.

Chapitre 1 : La production et l'utilisation des carburants durables alternatifs

La production de carburant commence par la production de matières premières suivie du prétraitement de ces dernières pour répondre aux exigences de processus de conversion et enfin être utilisé pour produire du carburant d'aviation (**Section 1**). Cette production diversifiée a permis à de nombreuses compagnies d'effectuer des vols de démonstration attestant du caractère prometteur des SAF (**Section 2**) et illustrant de la faisabilité de substitution avec le carburant conventionnel.



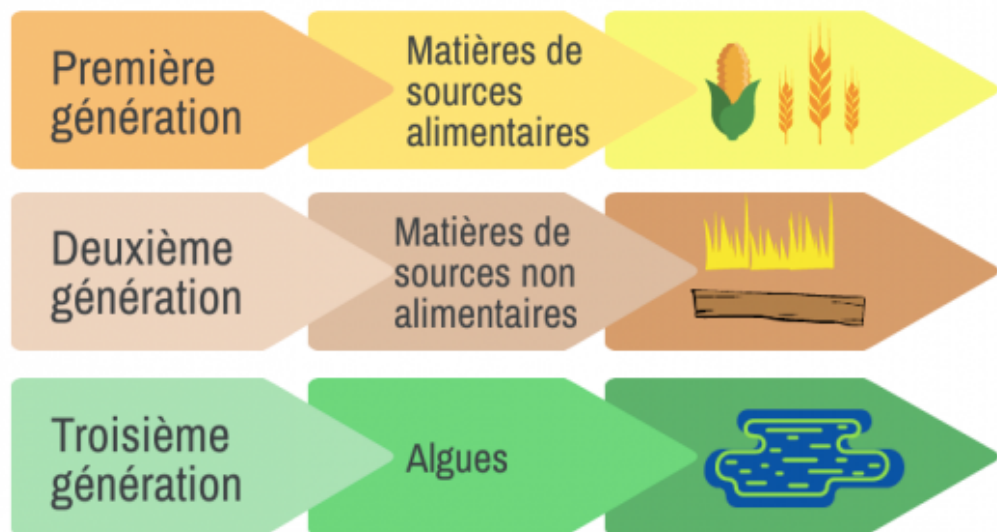
Section 1 : La production des biocarburants aéronautiques

Selon la génération de biocarburant ainsi que la ressource utilisée (A), il sera traité par une voie spécifique (B) et par la suite certifié (C).

A. Les différentes générations de biocarburants

Les biocarburants aéronautiques font l'objet d'une classification en trois générations :

- Les carburants de première génération qui eux sont issus à partir de cultures tel que la betterave, sorgho ou canne à sucre. Il s'agit de la filière de production principale des biocarburants routiers.
- Les carburants de deuxième génération sont issus d'huile de récupération, de résidus de bois transformés par gazéification ou encore du traitement biologique des sucres
- Les carburants de troisième génération qui sont issus de micro-algues. Cette génération est encore au stade de la recherche et de l'essai en laboratoire.



Source : <https://parlonssciences.ca/ressources-pedagogiques/les-stim-en-contexte/biocarburants-des-sources-denergie-de-remplacement>

B. Les voies de traitement des biocarburants

Plusieurs voies de traitement peuvent être utilisés pour convertir les matières premières en carburant d'aviation durables.

Il existe trois types de processus de conversion :

a) La conversion des lipides

Les lipides sont les composants essentiels des produits oléagineux. L'hydrotraitement ou l'hydrotransformation de ces lipides peuvent conduire à l'obtention de caractéristiques identiques à celle des carburants classiques. Le procédé HEFA utilise cette technique de conversion. Cela consiste en la réaction des huiles végétales en présence d'hydrogène et de catalyseurs (substance qui accélère la réaction chimique sans qu'elle soit consommée).

Quelles sont les limites de cette conversion ?

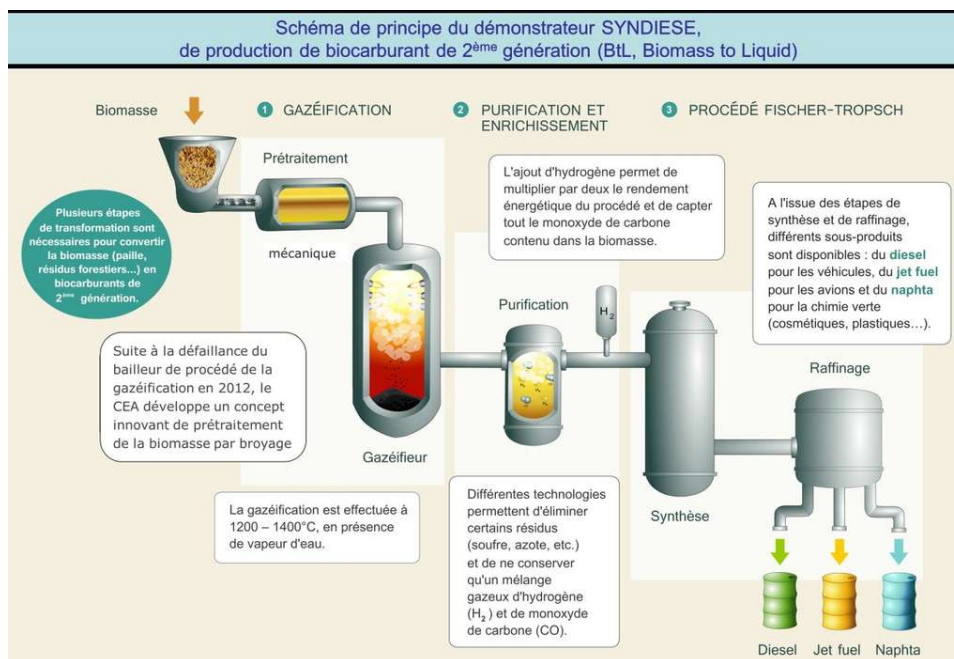
- Besoin très élevé en hydrogène (approvisionnement, coût, moyen d'obtention...)
- Coût de la production et de la logistique des matières premières très élevés du fait de l'approvisionnement continu nécessaire à une production importante.

b) La conversion thermochimique

Il existe plusieurs types de conversion thermochimique :

La première est la **gazéification** de la biomasse solide à des températures élevées pour obtenir un mélange de gaz (essentiellement du monoxyde de carbone et de l'hydrogène). Suite à la purification, le gaz de synthèse est ensuite synthétisé en un mélange contenant des chaînes d'hydrocarbures de différentes tailles. En fonction des catalyseurs utilisés, des étapes de post-raffinage et de la température du procédé on peut obtenir des produits aux caractéristiques identiques aux carburants classiques.

Le procédé Fischer-Tropsch utilise cette technique de conversion.



Source : <https://www.futura-sciences.com/planete/actualites/developpement-durable-synthese-biocarburants-partir-debris-vegetaux-testee-haute-marne-46051/>

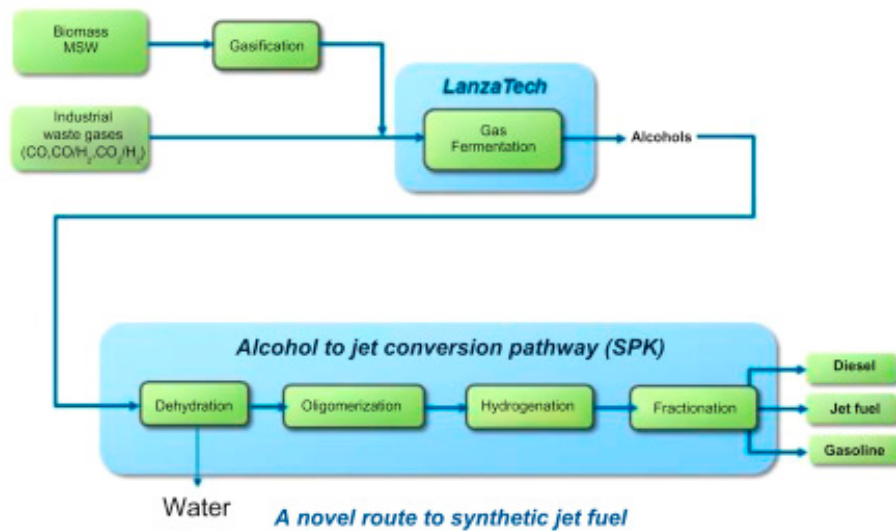
D'autres voies utilisant cette conversion thermochimique n'ont pas été approuvées par l'ASTM tel que le HDCJ (pyrolyse) ou encore la liquéfaction hydro thermique que l'on ne va pas détailler.

c) La conversion biochimique

Enfin, la dernière voie de conversion est la voie incluant le processus ATJ (Alcohol-to-jet) et le procédé HFS-SIP (également connu sous l'ancien nom : DSHC : direct fermentation of sugars to hydrocarbons).

Respectivement, le premier procédé suit plusieurs étapes telle que la déshydratation, l'oligomérisation (conversion de petites molécules en molécules plus complexes) et enfin l'hydrogénisation (ajout de l'hydrogène). Toutefois, une échelle de production assez compétitive ne peut résulter que de l'amélioration du processus d'oligomérisation et du développement de catalyseurs plus sélectifs.

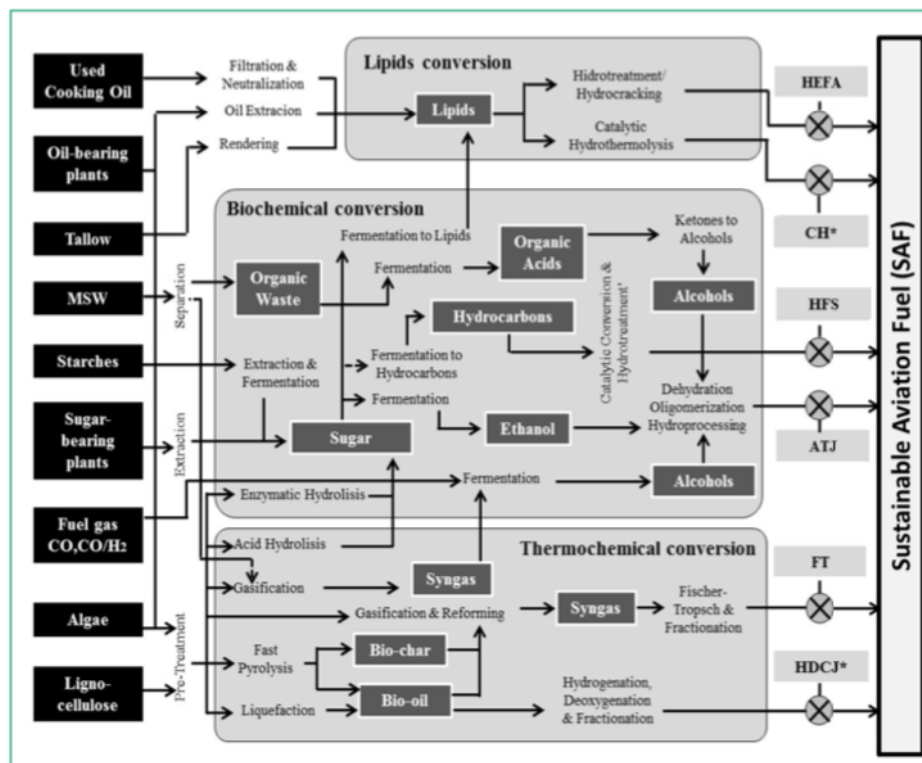
Alcohol to jet (ATJ) pathway



Source : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128045688000068>

Le second procédé, quant à lui, du fait des faibles rendements de conversion fait face à une contrainte de taille car cela engendre une faible faisabilité.

➤ Récapitulatif des différents procédés de conversion (Source : OAC)²³



²³ https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/Sustainable%20Aviation%20Fuels%20Guide_100519.pdf

C. Le processus de certification des biocarburants

La certification est une étape primordiale permettant de répondre à des exigences de sécurité. Les carburants aéronautiques répondent à des exigences techniques pointues par des caractéristiques physico-chimiques bien précises. Il existe deux types de certification : la certification technique et la certification « environnementale » relative à la durabilité du biocarburant.

Cette dernière est délivrée par des organismes indépendants comme le Roundtable for Sustainable Biomaterials (RSB) ou l'International Sustainability and Carbon Certification (ISCC). Cette certification atteste que la matière première ne provient pas de terres riches en carbone ou en biodiversité. Mais surtout qu'elle contribue à une réelle réduction d'émissions de CO₂ comparé à un carburant fossile²⁴.

Prenons un exemple : pour un pétrolier producteur de biocarburant la certification se base sur 4 coûts externes :

- *Devenir membre de l'organisme : environ 500€ par an (pour une société d'un chiffre d'affaire de plus de 10 millions d'euros par an)*
- *Prime d'enregistrement de la filière : max 500 €*
- *Prime annuelle de certification : max 500 € par an*
- *Audit de certification annuel : environ 3000€ par an*

= coût total = 5000€/an

Il n'est pas à oublier que cette certification complémentaire reste optionnelle.

Certaines compagnies aériennes vont même imposer certains critères.

Par exemple Air France va demander à ces certificateurs complémentaires d'auditer le biocarburant en question pour savoir s'il répond aux critères suivants ²⁵:

- Réduction de CO₂ au minimum égale à 75%

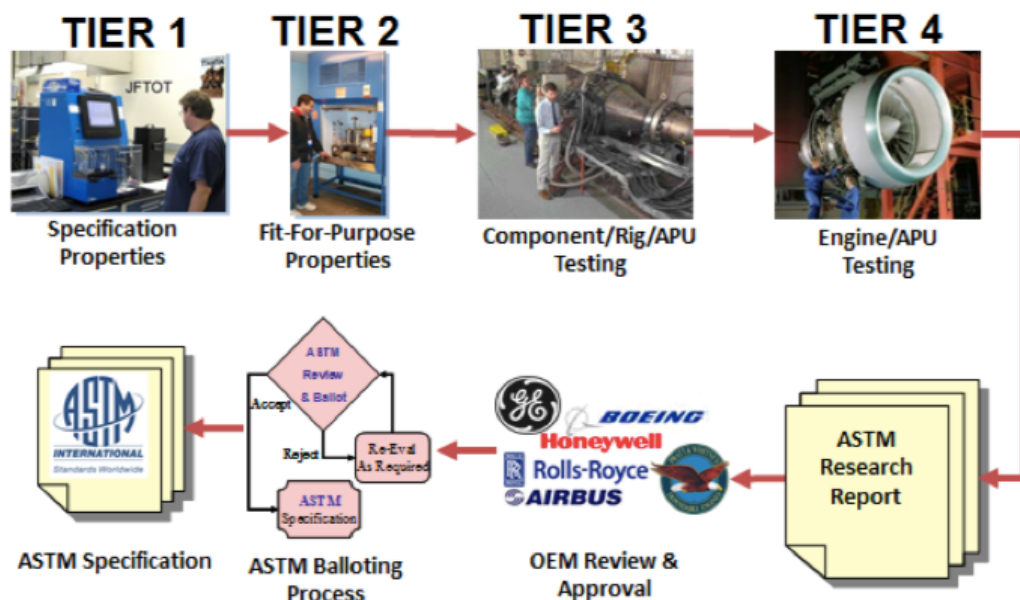
²⁴ <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/ECV%20-%20Mise%20en%20place%20d%27une%20filière%20de%20biocarburants%20aéronautiques%20en%20France.pdf>

²⁵ Webinaire les biocarburants aéronautiques

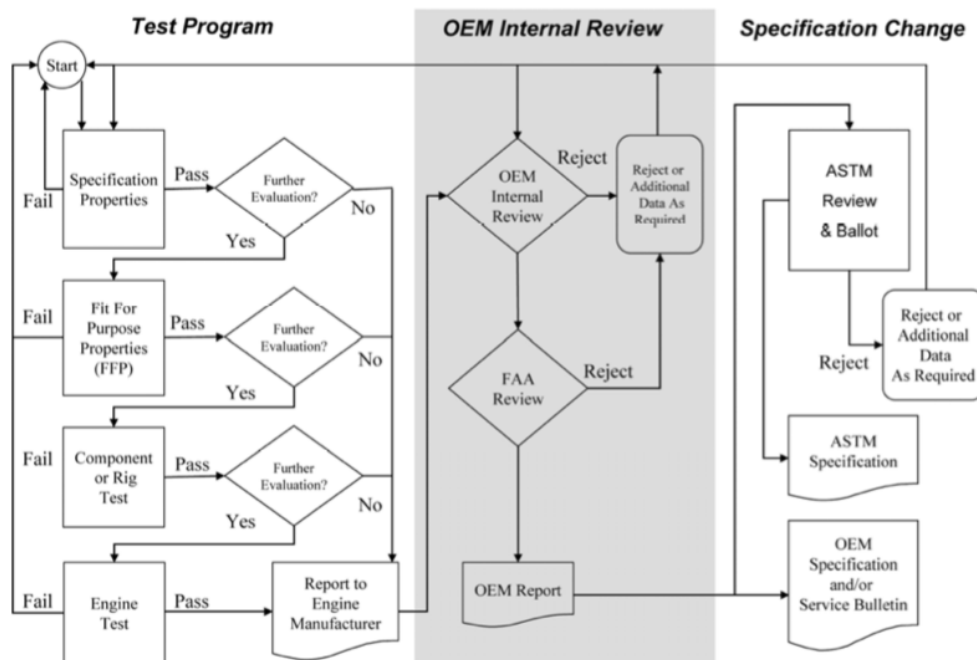
- Impact minimal sur la biodiversité, sans concurrence avec la production alimentaire ou l'accès aux ressources alimentaires et un impact positif sur le développement local.
- Acceptabilité sociétale = passagers Air France

Concernant la certification technique, elle se fait sous l'égide de l'ASTM (American Society for Testing Material) International selon la norme D7566.

Son coût est variable et peut coûter jusqu'à quelques millions d'euros. Outre l'aspect financier, le processus de certification est long et très complexe.



Source : https://www.caafi.org/information/pdf/d4054_users_guide_v6_2.pdf



Source : https://www.caafi.org/information/pdf/d4054_users_guide_v6_2.pdf

Aujourd'hui, il existe 7 types de biocarburants certifiés (et 1 en coprocessing) dans le but d'être mélangés au kérosène sans aucune modification des modèles. Néanmoins les proportions de mélange varient selon les procédés utilisés (à titre d'exemple 10% de farnésène pour 90% de kérosène) :

- **La filière Fischer-Tropsch** produit du carburant à partir de la biomasse : le gaz naturel, le charbon ou la lignocellulose par le biais de la gazéification. Cette filière permet une réduction allant jusqu'à 90% de GES, en fonction de la biomasse utilisée.
 - Incorporation maximum : 50%
 - L'entreprise Fulcrum BioEnergy s'est fixée pour objectif de produire 40 millions de litres à compter de 2020 quand bien même il présente de nombreuses contraintes. En effet, bien que certifié, ce procédé n'est pas assez mature pour se développer à très grande

échelle. Il requiert en effet des Capex très importants et il est difficile de maintenir un rendement élevé.

- **La filière HEFA (= Hydroprocessed esters and fatty acids, ou esters et acides gras hydrotraités)** utilise les huiles extraites de plantes oléagineuses ou de micro-algues. Cette filière permet une réduction allant jusqu'à 60% de GES.
 - Incorporation maximum : 50%
 - Approuvé en 2011
 - Son Technology Readiness Level (TRL) varie de 6 à 9 dépendamment des matières premières utilisées. Au vu des résultats très prometteurs des tests effectués avec ce procédé, il apparaît comme le biocarburant le plus pertinent et prometteur.
 - L'entreprise finlandaise Neste Oil Corporation s'est fixée comme objectif d'en produire 1 million de tonne par an à compter de 2022.
 - Toutefois ce procédé a beaucoup de faiblesses : le coût de production élevé, la concurrence d'usage directe avec l'huile alimentaire, des gisements limités etc
- **La filière DSHC (= Direct sugar to hydrocarbons ou transformation directe de sucres en hydrocarbures)** porte sur la fabrication de farnésène issue de la transformation du sucre, qui est ensuite hydrogéné et peut donc être incorporé dans un carburant comme le kérosène. Cette filière permet entre 70 et 80% de réduction de GES en fonction de la matière première sucrière utilisée.
 - Incorporation maximum : 10%
- **La filière alcohol to jet** procédant du raffinage, permettant de convertir les sucres en isobutanol puis en carburant pour avion. Cette filière permet une réduction allant jusqu'à 60% des GES.

- Incorporation maximum : 50%
- **La filière catalytic hydrothermolysis jet fuel (CHJ)**
- **La filière biological derived hydrocarbons from algae (HHC)**
- **Procédé coprocessing** (of renewable content with crude-oil derived middle distillable) pour une incorporation maximum à 5%

La question qui se pose est de savoir pourquoi le taux d'incorporation des biocarburants est limité à 50% ?

Deux réponses peuvent être envisagées :

- Cela permet d'assurer une compatibilité avec l'ensemble des flottes
- Du fait que ce taux a été fixé il y a 10 ans, les enjeux environnementaux n'étaient pas les mêmes. En effet, lors de la certification de la première filière de biocarburant, 50% d'incorporation apparaissait déjà comme un projet très ambitieux

Ainsi, les gains d'émissions sont quantifiés filière par filière. Aujourd'hui, l'industrie aéronautique ambitionne de dépasser ce seuil de 50% et souhaiterait atteindre un seuil de 100%.

Pour l'instant, ce seuil n'est pas envisageable et il ne faut pas omettre qu'un carburant 0 CO₂ n'est pas juste un carburant vert mais un carburant qui n'est pas brûlé.

Section 2 : Les vols de démonstration utilisant des biocarburants aéronautiques

A l'heure actuelle, il est encore impossible de faire voler un avion uniquement avec du biocarburant, le taux maximum de mélange comme précédemment énoncé s'élève à 50%, mais cela n'empêche pas plusieurs compagnies,

équipementiers, constructeurs d'effectuer des tests. D'abord sur des vols commerciaux (A) et un peu plus sur des vols de loisirs (B).

A. Vol de démonstration : aviation commerciale

a) Projet Lab'line for the future de Safran:

Le 21 octobre 2014, **Air France** a opéré un vol, en A321, alimenté en **biocarburant** (incorporé à hauteur de 10% dans le kérosène) à base de canne à sucre entre **Toulouse** et **Paris**, et a renouvelé cela une fois par semaine jusqu'en septembre 2015. L'objectif était de *“sensibiliser les pouvoirs publics sur la nécessité de développer une **filière biocarburants aviation en France** »*. En s'impliquant dans *« la recherche et la mise en oeuvre d'innovations telles que les biocarburants, Air France entend réduire l'empreinte carbone de ses vols et créer pour demain des parcours aériens plus durables, plus responsables et plus respectueux de l'environnement »*²⁶

b) Expérimentation du premier vol long-courrier

Air France-KLM, Total, Groupe ADP (Aéroport de Paris) et Airbus ont réalisé le 18 mai 2021 le premier vol long-courrier avec du carburant aérien durable issu de l'huile de cuisson. Ce vol a décollé de l'aéroport Charles-De-Gaulle à destination de Montréal (Canada). Le biocarburant utilisé et incorporé à hauteur de 16% est issu de déchets et de résidus provenant de l'économie circulaire. Il a été produit par Total à partir d'huiles de cuisson usagées grâce à sa bioraffinerie et à son usine et cela, sans recourir à de l'huile vierge d'origine végétale. Ce premier biocarburant alternatif français a obtenu la certification

²⁶ <https://www.air-journal.fr/2014-10-22-air-france-un-peu-de-vert-sur-le-toulouse-orly-video-5118257.html>

ISCC-EU par l'organisation International Sustainability & Carbon Certification. L'objectif était d'éviter 20 tonnes d'émissions de CO₂.²⁷

c) Premier vol au monde avec du kérosène synthétique durable

En janvier 2021, à bord d'un Boeing 737-800, la compagnie aérienne **KLM Royal Dutch Airlines** a effectué entre Amsterdam et Madrid le premier **vol passager** au monde alimenté en partie par du **kérosène synthétique à base de sources renouvelables**. Il s'agissait d'un mélange de 500 litres de kérosène synthétique durable produit par Shell à partir de CO₂, d'eau et d'énergie renouvelable solaire et éolienne. *“ Il s'agit d'une première étape importante et, avec nos partenaires, nous devons maintenant le développer, l'accélérer et le rendre commercialement viable »,* a déclaré Marjan van Loon, PDG de Shell Pays-Bas.²⁸

B. Vol de démonstration : aviation légère

➤ Petit zoom sur l'aviation légère qui elle aussi essaie les biocarburants

En juin 2021, un avion léger Van's Aircraft RV-8 a relié l'aérodrome allemand de Saarbrücken à celui de Reims-Prunay. Ce qui est étonnant c'est qu'un des deux réservoirs dudit avion avait été rempli d'un nouveau carburant d'aviation

²⁷ <https://www.environnement-magazine.fr/mobilite/article/2021/05/19/134411/experimentation-premier-vol-longcourrier-avec-biocarburant>

²⁸ <https://www.air-journal.fr/2021-02-09-klm-1er-vol-au-monde-avec-du-kerosene-synthetique-durable-5225864.html>

issu à 97% d'une filière agricole ; la betterave sucrière. Cela n'a nécessité aucune modification du moteur ou des réservoirs.²⁹

➤ **Premier vol d'un hélicoptère de secours avec du carburant durable**

En juin 2021, un vol en Airbus H145 opéré par ADAC luftrettung, une société allemande à but non lucratif spécialisée dans le secours hélicoptère a effectué son premier vol en SAF. Les moteurs Arriel 2 E de cet hélicoptère ont été ravitaillés avec un biocarburant de deuxième génération



Source : Airbus

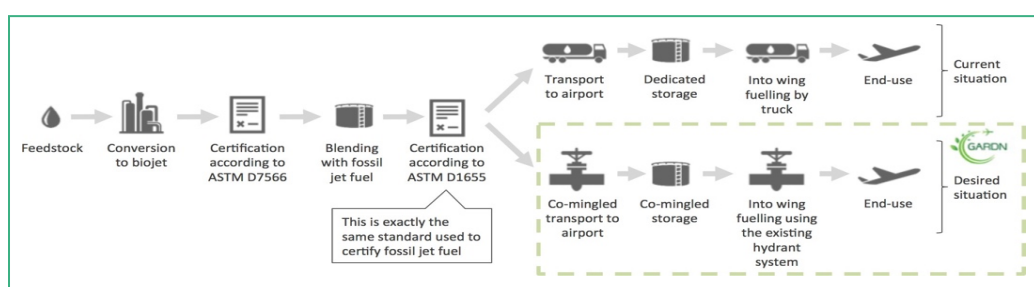
²⁹ <https://www.aerobuzz.fr/industrie/en-vol-avec-97-de-carburant-renouvelable-dans-le-reservoir/>

Chapitre 2 : Les différentes contraintes

Le déploiement des carburants alternatifs d'aviation se heurtent à diverses contraintes à la fois des contraintes liées à la chaîne de valeur (**Section 1**) et des contraintes liées au cadre réglementaire (**Section 2**).

Section 1 : La nécessité de modifier la Supply Chain

Le carburant est produit dans des raffineries de pétrole et distribué par des sociétés de transport et de logistiques. Ces acteurs s'engagent également à ce que le produit reste conforme à sa certification initialement, c'est-à-dire aux spécifications sans détérioration ni contamination durant le transport et le stockage.



Source : SkyNRG, 2017

Comme l'atteste ce document, le cheminement initial se présente comme suit :

- Matière première
- Conversion en biojet
- Certification (ASTM D7566)
- Mélange avec du carburéacteur fossile
- Certification (ASTM D1655)
- Transport jusqu'à l'aéroport
- Stockage
- Ravitaillement
- Utilisation finale

La situation souhaitée se présente comme cela :

- Matière première
- Conversion en biojet
- Certification (ASTM D7566)
- Mélange avec du carburéacteur fossile
- Certification (ASTM D1655)
- Transport combiné à l'aéroport
- Stockage groupé
- Ravitaillement à l'aide du système de bornes incendie existant
- Utilisation finale

Ce projet mené à l'aéroport Pierre-Elliott-Trudeau de Montréal est axé sur une volonté de penser une logistique permettant d'aider les aéroports à passer à une distribution régulière de SAF à partir directement d'infrastructure principale de ravitaillement de l'aéroport. Comme le font, l'aéroport d'Oslo depuis 2015, l'aéroport de Los Angeles depuis 2016, l'aéroport de Stockholm depuis 2017 ainsi que de nombreux autres aéroports internationaux.

Cela permettra une expansion rapide du marché des biocarburants aéronautiques.

Section 2 : une réglementation de plus en plus incitative à l'incorporation de biocarburants

La législation a toujours su accompagner les mutations de l'industrie aéronautique afin d'assurer une concurrence équitable entre les différents acteurs du secteur aérien par la convergence du cadre réglementaire. La France (A) mais également l'Europe et le Monde (B) entier se sont mobilisés pour proposer des solutions au déploiement d'une filière de biocarburants.

A. La feuille de route française

a. Les grandes lignes de la feuille de route

Cette feuille de route a pour but de préciser l'ambition et la stratégie française au développement d'une filière de biocarburant aéronautique durable dès 2025. Elle précise que les biocarburants devront prioritairement être produits à partir de ressources listées à l'annexe IX de la directive énergie renouvelable (2018/2001/CE) ci-dessous :

Partie A.

- ☐ *Algues si cultivées à terre dans des bassins ou des photobioréacteurs,*
- ☐ *Fraction de la biomasse correspondant aux déchets municipaux en mélange, mais pas aux déchets ménagers triés relevant des objectifs de recyclage fixés à l'article 11, paragraphe 2, point a), de la directive 2008/98/CE.*
- ☐ *Biodéchets tels que définis à l'article 3, point 4), de la directive 2008/98/CE, provenant de ménages privés et faisant l'objet d'une collecte séparée au sens de l'article 3, point 11), de ladite directive.*
- ☐ *Fraction de la biomasse correspondant aux déchets industriels impropres à un usage dans la chaîne alimentaire humaine ou animale, comprenant les matières provenant du commerce de détail et de gros ainsi que des industries de l'agroalimentaire, de la pêche et de l'aquaculture, et excluant les matières premières visées dans la partie B de la présente annexe.*
- ☐ *Paille, Fumier et boues d'épuration, Effluents d'huileries de palme et rafles, Brai de tallol, Glycérine brute, Bagasse, Marcs de raisins et lies de vin, Coques, Balles (enveloppes), Râpes,*
- ☐ *Fraction de la biomasse correspondant aux déchets et résidus provenant de la sylviculture et de la filière bois, c'est-à-dire les écorces, branches, produits des éclaircies précommerciales, feuilles, aiguilles, cimes d'arbres, sciures de bois, éclats de coupe, la liqueur noire, la liqueur brune, les boues de fibre, la lignine et le tallol.*

- ☐ *Autres matières cellulosiques non alimentaires.*
- ☐ *Autres matières ligno-cellulosiques à l'exception des grumes de sciage et de placage.*
- ☐ *Huiles de cuisson usagées.*
- ☐ *Graisses animales classées dans les catégories 1 et 2 conformément au règlement (CE) n° 1069/2009.*

Cette diversification de matières premières doit permettre de favoriser au maximum le déploiement de la filière sans empiéter sur les terres agricoles.

b. Une chaîne logistique simple et économe

Toujours dans le même objectif, cette feuille de route précise qu'il serait préférable que les nouvelles bioraffineries en France puissent être à proximité des plates-formes aéroportuaires ou de leurs chaînes d'approvisionnement et Proximité des zones de production des matières premières.

c. Mise en place de la TIRIB

La France a adopté en 2020 un nouveau dispositif fiscal : la taxe incitative relative à l'incorporation de biocarburants (TIRIB) contribuant à la réduction des émissions à gaz à effet de serre, incitant à l'incorporation de 1% de carburants durables dans le kérosène vendu sur les aéroports français à compter de 2022. Cet objectif pourra faire l'objet de réévaluation au cours des années.

Pour rendre opérationnelle, la feuille de route il a été fait un appel à manifestation d'intérêt lancé en 2020, l'idée étant d'identifier en France des projets de production de carburants durables.

A titre d'exemple pour le groupe Air France, 1% d'incorporation équivaut à 26 000 tonnes soit plus de 65 millions d'euros par an.

NB : En France, l'entité compétente en matière de R&D SAF est le CORAC (Conseil pour la recherche aéronautique civile). Il a été créé en juillet 2008 regroupant l'ensemble des acteurs du secteur aérien tels que les avionneurs, les compagnies aériennes, et les aéroports. Il est présidé par le Ministre des Transports dont les travaux permettent d'élaborer un plan de recherche pluriannuel sur les objectifs de la filière.

B. L'implication européenne et mondiale au développement de filière de biocarburants aéronautiques

a. Pacte vert pour l'Europe (European Green Deal)

Lors du sommet mondial sur le climat en 2019, la commission européenne a lancé le pacte vert pour l'Europe (European Green Deal) visant à faire de l'Europe le premier continent neutre sur le plan climatique avec pour objectif 0 émissions GES d'ici 2050. Outre la proposition d'une tarification du carbone pour le secteur de l'aviation, qui bénéficiait jusqu'à présent d'une exception. La commission propose de promouvoir des carburants d'aviation durables, et de prévoir, pour les avions, l'obligation d'utiliser des carburants mixtes durables au départ des aéroports de l'UE³⁰.

b. Refuel EU - aviation

Ce programme, très soutenu par la France, visant à réduire les émissions, impose un pourcentage minimal de mélange de carburants d'aviation durables au kérosène. Cette initiative devrait permettre à l'échelle européenne une trajectoire de déploiement commune mais surtout d'un mandat d'incorporation homogène. Néanmoins seuls les vols intra-européens sont concernés.

³⁰ https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-european-green-deal_fr

c. Niveau international

Le CAEP est également composé d'un groupe de travail sur les carburants de remplacement (FTG) créée en 2019. Ce groupe concentre les travaux requis pour les carburants d'aviation durable (SAF) et les carburants d'aviation à faible teneur en carbone (LCAF) dans le cadre de la maintenance de l'annexe 16 volume IV ainsi que d'autres initiatives de l'OACI.

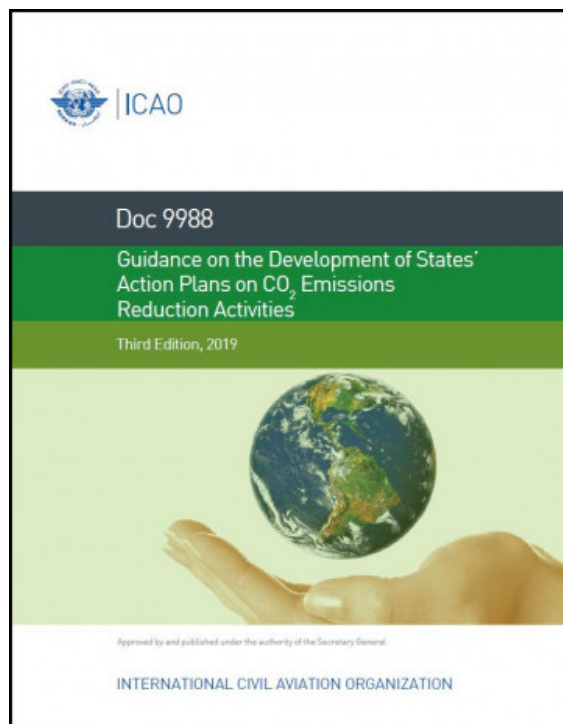
L'OACI a également élaboré un document intitulé : le Doc 9988, « *Orientations sur l'élaboration des plans d'action des États sur les activités de réduction des émissions de CO₂* », visant à aider les États membres à élaborer et à mettre en œuvre leurs plans d'action.

D'après les rapports de l'OACI, « *en janvier 2018, 106 États représentant plus de 90,8 % des tonnes-kilomètres payantes (RTK) mondiales avaient volontairement soumis leurs plans d'action à l'OACI* ».

Ce document est le panier de mesures que les États membres peuvent envisager pour réduire les émissions de CO₂ de l'aviation civile. L'utilisation de carburants d'aviation durable est le moyen le plus prometteur des États Membres d'atteindre leurs objectifs environnementaux et de réduction des émissions de carbone.

Ce document a également comme but d'informer les États membres de l'OACI sur la façon dont les carburants d'aviation durables peuvent être déployés pour réduire les émissions de

CO₂ et décrit « *les voies de production de carburant, les contraintes d'utilisation, les avantages environnementaux et autres, et les perspectives politiques sur l'utilisation et le développement de ces carburants* ».



Titre 2 : Les différents enjeux des biocarburants aéronautiques

La production des biocarburants aéronautiques soulève plusieurs enjeux, des enjeux avant la production de ces derniers (**Chapitre 1**) et des enjeux ultérieurs à la production (**Chapitre 2**). La prise en compte de ces contraintes est essentielle au déploiement d'une filière de biocarburants.

Chapitre 1 : Les enjeux pré-production

Avant de produire un biocarburant il faut s'assurer de la disponibilité de la ressource et de sa compatibilité avec le kérosène (**Section 1**) et enfin du coût économique engendré par cette production (**Section 2**).

Section 1 : Une production de biocarburant en pleine émergence du fait de deux grands enjeux : la disponibilité de la ressource et du drop in

La production massive de biocarburant aéronautique est freinée par la disponibilité même de la ressource (A) et par sa compatibilité avec le carburant conventionnel, c'est que l'on appelle communément le drop-in (B).

A. L'enjeu de la disponibilité de la ressource

Tous les carburants alternatifs au kérosène fossile sont confrontés au même défi de la disponibilité des ressources, bien qu'ils apparaissent comme une bonne alternative si le pétrole venait à manquer.

L'enjeu de la disponibilité des ressources est un enjeu majeur du fait que la substitution des énergies fossiles par des énergies renouvelables suppose l'utilisation de ressources naturelles rares et en danger.

Par définition les *“ressources naturelles regroupent les matières premières, les espèces vivantes et leur diversité, l'eau, les sols et les énergies d'une part, les cycles du carbone, de l'azote et de l'eau, le climat et le fonctionnement des écosystèmes d'autre part.”*

Le majeur problème est que côté demande, les besoins sont gargantuesques, alors que côté offre les volumes de production ne sont pas suffisants bien qu'il est possible de transformer en carburant aéronautique presque tous les types de biomasse.

B. L'enjeu de drop-in

L'industrie aéronautique a adoptée depuis des années des normes de sécurité strictes pour l'exploitation et l'entretien de ses équipements. Les avions sont souvent ravitaillés dans différents États qui parfois ont des normes nationales pour le carburéacteur, d'autant plus que les carburéacteurs mélangés viennent souvent de sources différentes. Il est donc essentiel d'harmoniser les spécifications techniques relatives aux carburants. Ainsi, l'introduction de carburant venant de diverses sources nécessite la mise en œuvre du « drop-in ». On parle de carburant « drop-in » lorsque celui-ci peut se substituer en partie ou intégralement au kérosène conventionnel sans qu'il n'y ait d'impact opérationnel c'est-à-dire sans que l'on modifie les infrastructures, ni les avions et moteurs existants ou futurs.

Il faut d'abord une similarité en termes de composition et également une similarité en termes de propriétés physico-chimiques. Le mélange final doit en effet respecter la spécification du jetA1. Le comportement du mélange est considéré comme identique à celui du jetA1 de référence sur un ensemble de propriétés.

Tout carburant non-drop in portera à mal la sécurité de l'avion. Mais surtout nécessitera la mise en place de nouvelles infrastructures à tous les aéroports, ce qui n'est pas intéressant économiquement parlant.

Section 2 : L'enjeu économique de la production des biocarburants aéronautiques

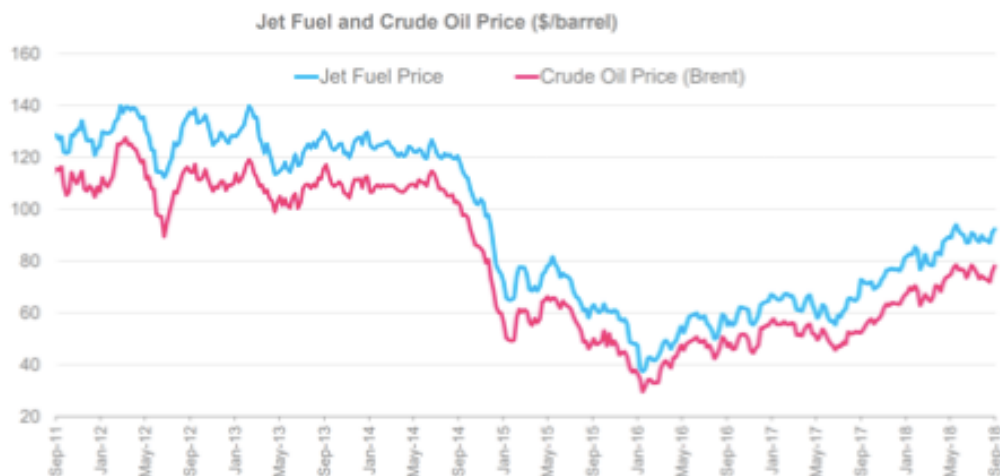
Le coût élevé des carburants alternatifs durables comparé au kérosène (A) soulève la nécessité de faire appel à des acteurs extérieurs à la chaîne de valeur pour bénéficier d'un soutien financier (B), vital à l'utilisation récurrente et usuelle des biocarburants aéronautiques.

A. Comparatif entre le coût du kérosène et le coût des biocarburants aéronautiques

Le biocarburant d'aviation reste encore trop peu produit et utilisé pour des raisons économiques. Les filières de biocarburants sont fortement dépendantes du coût de la ressource, qu'il s'agisse de sucre, d'huile ou de ligno-cellulose. Ainsi, l'enjeu majeur du déploiement d'une filière de biocarburants reste le prix. En effet, comme le précisait le PDG de Total, Patrick Pouyanné : "Le jet fuel coûte 400 euros la tonne, le biocarburant coûte 1.500". Il explique que « *Sur un Paris-New York, si on met 1% de biocarburant dans un avion, cela va augmenter le prix du billet aller-retour de 5 dollars* ».

Seule "une forte **impulsion des pouvoirs publics**" selon ses dires pourrait faire baisser les coûts.

Bien que le prix du kérosène suive le cours du pétrole, cette fluctuation varie selon les compagnies car toutes n'ont pas la même structure de coûts ni même les mêmes stratégies de couverture.



Source : IATA

Néanmoins, il paraît évident que le prix compétitif et très faible de ce dernier dissuade les compagnies aériennes dont l'achat de carburant représente une portion importante de leurs dépenses (entre 18% et 35%), bien qu'elles peinent parfois à suivre le rythme.

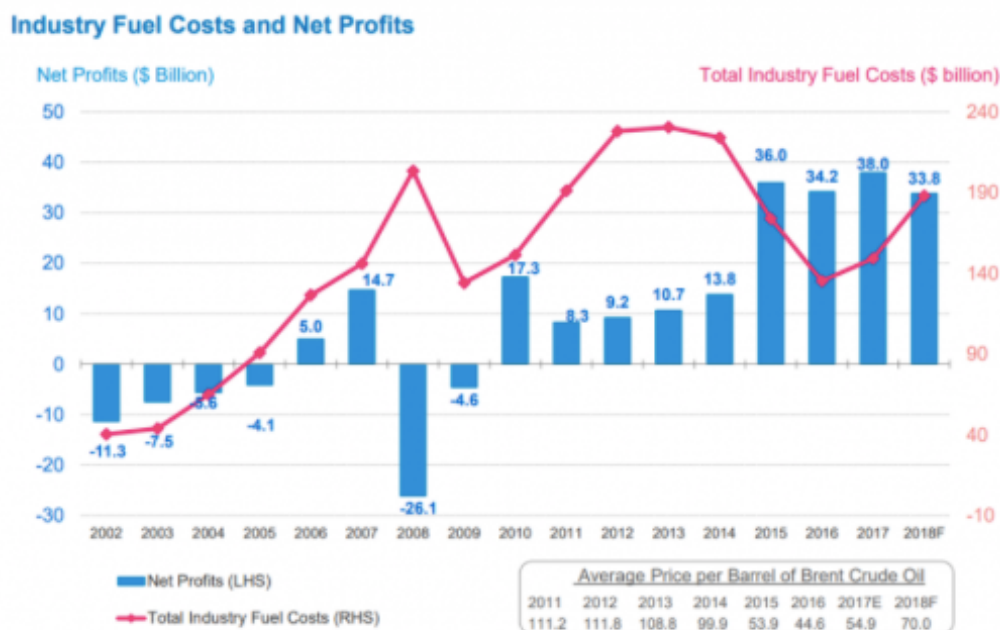
Fuel Impact on Operating Costs

Year	% of Operating Costs	Average Price per Barrel of Crude (US\$)	Break-even Price per Barrel (US\$)	Total Fuel Cost
2004	17.2%	US\$38.3	US\$34.7	US\$65 billion
2005	22.0%	US\$54.5	US\$52.0	US\$91 billion
2006	27.2%	US\$65.1	US\$68.1	US\$127 billion
2007	28.6%	US\$73.0	US\$81.7	US\$146 billion
2008	35.7%	US\$99.0	US\$83.3	US\$203 billion
2009	28.2%	US\$62.0	US\$59.1	US\$134 billion
2010	26.9%	US\$79.4	US\$89.8	US\$151 billion
2011	29.8%	US\$111.2	US\$116.1	US\$191 billion
2012	32.3%	US\$111.8	US\$117.1	US\$228 billion
2013	32.0%	US\$108.8	US\$114.8	US\$230 billion
2014	29.2%	US\$99.9	US\$107.4	US\$224 billion
2015	24.1%	US\$53.9	US\$72.6	US\$174 billion
2016	19.1%	US\$44.6	US\$61.5	US\$135 billion
2017	19.8%	US\$54.9	US\$72.6	US\$149 billion
2018F	22.5%	US\$70.0	US\$85.1	US\$188 billion

Source : IATA

Ce tableau recense la liste de la part du kérosène dans les coûts opérationnels des compagnies (% of Operating Costs, colonne 2), le prix du baril par an (Average price per barrel of crude, colonne 3), le cours maximal pour avoir une industrie équilibrée (Break-even price per barrel, colonne 4) et enfin la 5^{ème} colonne correspond au prix total brut cumulé.

A ce tableau se rajoute le graphique suivant :



Source : IATA

La courbe en rose correspond au total du coût kérosène global comparé en bleu aux bénéfices.

On constate que depuis 2002, les cours pétroliers se sont envolés avec un pic en 2008 (crise des subprimes), les compagnies peinent à suivre le cours.

Au vue de ces constations de coûts, il n'apparaît pas la moindre viabilité économique à l'utilisation régulière de SAF.

Mais les compagnies aériennes ont-elles réellement le choix ? Pas vraiment... outre l'aspect légal contraignant, le déploiement et l'incorporation incitative des

carburants d'aviation durables correspondent à une perspective écoresponsable et une action en faveur de l'atténuation du changement climatique.

B. La nécessité d'un soutien financier

Il faudrait envisager un plan de soutien. Dans un premier temps un plan de soutien à l'investissement et à la production par à titre d'exemple la fixation d'un prix garanti pour le producteur de biomasse. Mais il faut dans un second temps, soutenir l'utilisateur final c'est-à-dire la compagnie aérienne pour pallier la différence entre le prix fixé et le prix de vente effectif aux utilisateurs (ca peut aussi être les motoristes).

Sans ce soutien, le surcoût peut entraîner la baisse du ravitaillement des compagnies aériennes.

D'autant plus que qui dit massification de la production dit baisse des prix.

Chapitre 2 : Les enjeux post-production

Une fois produit, le biocarburant doit répondre à des impératifs de durabilité (**Section 1**). L'étude du cycle de vie d'un biocarburant permet d'établir le bilan écologique et énergétique de ce dernier (**Section 2**).

Section 1 : L'enjeu de la durabilité des biocarburants aéronautiques

La biomasse est indéniablement une source d'énergie mais il n'est pas sans savoir qu'elle constitue tout d'abord la source première de la production des aliments. Ainsi sa transformation en énergie reste initialement au second plan.

A titre d'exemple, pour les biocarburants de première génération, la production de la ressource doit nécessairement prendre en compte les impératifs d'agro-écologie. Le risque étant un fort déséquilibre du bilan. Actuellement ils occupent 2Mha environ soit 7% de la surface agricole utile.

Lorsque l'on sait que l'incorporation des biocarburants est de plus en plus envisagée mondialement se pose la question de la concurrence d'usage avec les productions alimentaires.

Comme l'a précisé The Roundtable on Sustainable Biomaterials (RSB) :*« Aucun compromis en matière de durabilité et une coopération et une gouvernance internationale sont essentielles afin de mettre en place un programme d'utilisation des terres adapté, pour veiller à ne pas nuire aux ressources en nourriture et en eau, ni augmenter les émissions de CO2. »*

Elle a ainsi développé une liste de principe et de critères à respecter pour répondre à ces exigences de durabilité.

12 principles and associated criteria for a potential alternative jet fuel sustainability meta-standard	
Principle 1. Legality Criterion 1.1 Sustainable alternative aviation fuel shall comply with all applicable national and local laws and regulation.	wastes shall not be practised, unless there are no viable alternatives. Criterion 7.2 Air pollution emissions shall be minimised.
Principle 2. Greenhouse gas emissions Criterion 2.1 Sustainable alternative aviation fuel shall achieve net greenhouse gas emissions reductions on a life-cycle basis.	Principle 8. Use of chemicals, wastes and by-products Criterion 8.1 Chemicals, wastes or by-products arising from fuel production shall be stored, handled and disposed of responsibly to safeguard the environment and to minimise the risk to people.
Principle 3. Carbon stock conservation Criterion 3.1 Sustainable alternative aviation fuel shall not be made from biomass obtained from land with high carbon stock.	Principle 9. Land and Water rights and Community engagement Criterion 9.1 Sustainable alternative aviation fuel operations shall respect existing land rights and land use rights. Criterion 9.2 Sustainable alternative aviation fuel operations shall respect the existing water rights of local and indigenous communities. Criterion 9.3 Sustainable alternative aviation fuel operations shall only be established with the free, prior and informed consent of land and water users or owners.
Principle 4. Biodiversity conservation Criterion 4.1 Sustainable alternative aviation fuel shall not be made from biomass obtained from land with high biodiversity value. Criterion 4.2 Basic ecosystem services in critical situations shall be maintained or enhanced. Criterion 4.3 Biodiversity within the area of operation shall be maintained or enhanced. Criterion 4.4 Biodiversity within the area of operation shall not be compromised by the use of genetically modified plants, micro-organisms or algae.	Principle 10. Human rights and Labour rights Criterion 10.1 Human rights and labour rights governing child labour, forced labour, discrimination, freedom of association and the right to organise and bargain collectively shall not be violated.
Principle 5. Soil conservation Criterion 5.1 Good agricultural practices shall be implemented to maintain or enhance soil physical, chemical, and biological conditions.	Principle 11. Local food security Criterion 11.1 Sustainable alternative aviation fuel operations shall not adversely impact the human right to adequate food and shall not adversely impact food security in food insecure regions.
Principle 6. Sustainable water use Criterion 6.1 Good agricultural practices shall be implemented to maintain and improve water quality. Criterion 6.2 Good agricultural practices shall be implemented to use water efficiently, and to avoid the depletion of surface or groundwater resources beyond replenishment capacities.	Principle 12. Rural, Social and Economic development Criterion 12.1 In regions of poverty, aviation fuel operations shall contribute to the social and economic development of local, rural and indigenous people and communities.
Principle 7. Air quality Criterion 7.1 Open-air burning as part of land clearance, or the burning of agricultural residues and	

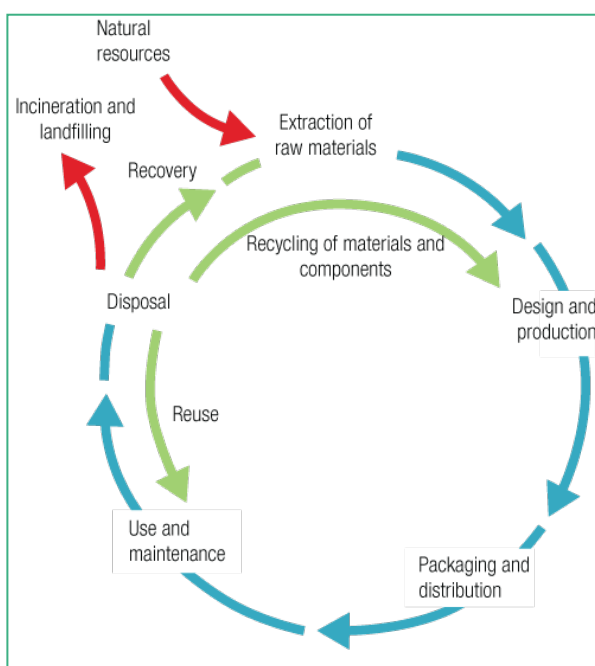
Source : Ecofys and the round table on sustainable biomaterials

La durabilité des biocarburants s'envisage autant sur les impacts environnementaux de la production (impact sur les sols, biodiversité, eau etc) que sur les émissions émises. Elle est donc mesurée tout au long de la chaîne d'approvisionnement. Ainsi, la certification de la table ronde sur les biocarburants durables (RSB) garantit la durabilité du biocarburant en question. La norme RSB prend en considération plusieurs éléments : taux de réduction

des émissions de GES, droit de l’homme et du travail, sécurité alimentaire locale car à titre de rappel : la production de biocarburants ne doit pas empiéter sur *“les cultures alimentaires, sur les terres arables ou boisées, alors même que d’autres secteurs d’activité convoitent ces carburants”*³¹. Elle prend également en compte la légalité, la planification, le contrôle et l’amélioration des opérations de biocarburants, la conservation, l’utilisation de la technologie et la gestion des déchets, les effets sur le développement rural et social et sur l’eau, le sol et l’air. ³²

Section 2 : L’impact environnemental et énergétique de l’utilisation des biocarburants

Afin d’établir ce bilan il faut prendre en compte chaque étape de production depuis la culture, la collecte à l’utilisation finale dans l’aéronef dudit biocarburant.



Source : UNEP/SETAC 2016

Ce schéma représente le cycle de vie typique d'un produit.

³¹ <https://www.linodurable.fr/environnement/les-carburants-durables-indispensables-pour-decarboner-laviation-24781>

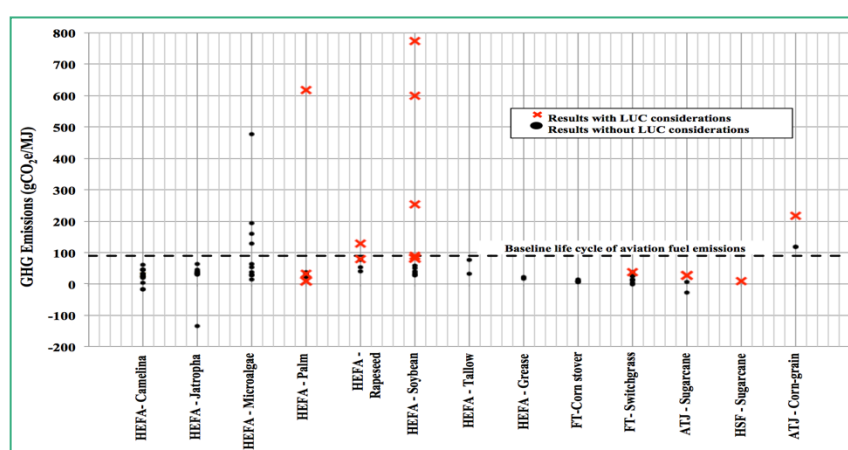
³² https://agriculture.gouv.fr/sites/minagri/files/cgaer_15098_cgedd_010298-01_2015_rapport.pdf

Bien que la combustion des carburants d'aviation durable émette des quantités relativement similaires à celles des carburants pétroliers classiques, ils présentent un avantage environnemental sur la base de leur cycle de vie que les carburéacteurs n'ont pas. En général, à chacune des étapes du cycle de vie telles que la récupération, le traitement, le transport ou encore l'utilisation finale des émissions GES sont émises. L'empreinte carbone est donc obtenue en additionnant la globalité des émissions dans une analyse de cycle de vie.

NB : L'avantage de l'utilisation de la biomasse est que les plantes absorbent le CO₂ au cours de la photosynthèse lorsqu'elles croient.

De nombreuses études ont été menées par des professionnels, chaque procédé émet des émissions GES variable.

Comme on peut le constater sur le graphique, presque toutes les filières ont obtenu de meilleurs résultats que le kérosène tout le long du cycle de vie (sans les effets LUC, qui correspondent aux effets du changement d'affectation des sols), sauf la filière HEFA à partir de micro algue (dont les performances environnementales des plantes dépendent fortement du stade agricole et du lieu de culture) ainsi que la filière ATJ par iso butanol à partir de grains de maïs.



Source : Capaz et Seabra, 2016

CONCLUSION

Depuis des années les différents acteurs de l'industrie aéronautique se mobilisent afin de répondre aux défis climatiques soulevés. Bien que des technologies innovantes et révolutionnaires aient été proposées par l'industrie aéronautique afin de réduire la consommation de carburant, elles se sont avérées insuffisantes. C'est pour cela que les biocarburants aéronautiques ont été mis en avant sur la scène de l'aviation internationale. Outre leur contribution à l'objectif mondial fixé par l'OACI d'une croissance neutre en carbone, le développement des biocarburants aéronautiques peut faire progresser le développement social et économique. Ce n'est cependant pas avec aisance que le déploiement de ces filières de carburants durables s'est affirmé. En effet, confronté à de nombreuses problématiques et contraintes notamment économiques, ces filières peinent à se développer.

Pour autant, les aéroports, les compagnies aériennes, les États, et les autres parties prenantes sont très impliqués et continuent de l'être malgré les nombreuses difficultés rencontrées. La multitude de matières premières et de processus de conversion offre une lueur d'espoir de souplesse pour la mise en place de chaînes d'approvisionnement en carburants durables appropriés et adaptés aux caractéristiques de chaque État.

Des nouvelles filières de biocarburants aéronautiques, sont régulièrement certifiées par l'ASTM, ce qui atteste que l'industrie des carburants durables évolue vite et est très prometteuse.

Toutefois, qu'en sera-t-il avec la crise de la covid-19 qui vient ponctuer le secteur aérien d'une crise financière inédite ?

Comme précédemment énoncé, l'aspect économique est la première barrière à laquelle se heurte le déploiement de filières de biocarburants aéronautiques. Se pose ainsi la question de savoir : comment un secteur déjà fragilisé par la crise

sanitaire peut-il contribuer financièrement à l'utilisation de biocarburants aéronautiques relativement très coûteux comparé au kérosène conventionnel ?
La réponse reste malheureusement pour l'instant en suspens...

BIBLIOGRAPHIE

1° Répertoires et Encyclopédies

- Larousse, définition biocarburant :
<https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/biocarburant/9386>
- Insee, définition gaz à effet de serre :
<https://www.insee.fr/fr/metadonnees/definition/c1855>

2° Ouvrages et Travaux

- Jean Marc Bara, « *LE CHANGEMENT CLIMATIQUE COMMENT RESPECTER LES ENGAGEMENTS DE L' ACCORD DE PARIS ? Transport aérien et développement durable, Nouvelles technologies Biocarburants* », séminaire IFURTA, 2020.
- Robert Mauri, « *Organisations internationales, réglementation et contribution de l'aviation à la lutte contre le changement climatique* », séminaire IFURTA 2020.
- Julie Laborde dit Bouriat, « Introduction au droit aérien », enseignement IFURTA, 2020.

3° Thèses et Mémoires

- Thèse

- « *Aviation civile et changements climatiques : comment réduire l'empreinte carbone grâce à la tarification du carbone et au développement de carburants alternatifs ?* », Marie-Lee Pelletier, Centre Universitaire de formation en environnement et en développement durable de Sherbrooke, Janvier 2020 :
https://savoirs.usherbrooke.ca/bitstream/handle/11143/16462/Pelletier_Marie_Lee_MEnv_2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y

4° Articles

- Florian Gandon et Corentin Lefloch, « *Innover et se rénover : plan de vol pour une industrie aéronautique durable* », premier prix des Usaire Student Awards 2020 : https://www.isac-supero.fr/IMG/pdf/livre_blanc_-_f._gandon_c._lefloch-version_ecran.pdf
- M.-L.W., « *Greta Thunberg : un voyage en voilier vers New York... mais aussi six billets d'avion* », le Parisien, 17 août 2019 : <https://www.leparisien.fr/societe/greta-thunberg-un-voyage-en-voilier-vers-new-york-mais-aussi-six-billets-d-avion-17-08-2019-8134878.php>
- « *Action : l'avion vert ne sauvera pas le climat* », Greenpeace, 5 mars 2021 : <https://www.greenpeace.fr/action-lavion-vert-ne-sauvera-pas-le-climat/>
- Ricardo Moraes, « *Roissy-CDG : GreenPeace repeint en vert un Boeing 777 d'Air France* », Air Journal , 6 mars 2021 : <https://www.air-journal.fr/2021-03-06-roissy-cdg-greenpeace-repeint-en-vert-un-boeing-777-dair-france-5226423.html>
- Vincent Albinet, « *avec son projet fello'fly Airbus veut faire voler ses avions comme les oies sauvages pour économiser le carburant* », France3 Occitanie, 11 septembre 2020 : <https://france3-regions.francetvinfo.fr/occitanie/haute-garonne/toulouse/son-projet-fello-fly-airbus-veut-faire-voler-ses-avions-oies-sauvages-economiser-carburant-1871750.html>
- Aurore Richel, « *biocarburants, carburants de synthèse, kérosène vert ou l'éloge de la diversité terminologique* », 20 septembre 2019 : <http://www.chem4us.be/environnement/carburants/>

- Benjamin Everaert, « *La commission européenne envisage de taxer le kérosène* », l'Echo, 4 juillet 2021 : <https://www.lecho.be/entreprises/aviation/la-commission-europeenne-envisage-de-taxer-le-kerosene/10317908.html>
- Thibaut Chéreau, « *la taxe européenne sur le kérosène pourrait rapporter 5 milliards d'euros aux États membres* », Euractiv, 16 juillet 2021 : <https://www.euractiv.fr/section/plan-te/news/la-taxe-europeenne-sur-le-kerosene-pourrait-rapporter-5-milliards-deuros-aux-etats-membres/>
- « *Les émissions de CO2 du transport aérien ont chuté de plus de 50% en 2020 en Europe* », 20 minutes, 4 janvier 2021 : <https://www.20minutes.fr/planete/2944643-20210104-emissions-co2-transport-aerien-suivi-effondrement-traffic-2020>
- Antony Angrand, « *CFMI lance le programme RISE* », Air cosmos, 14 juin 2021 : <https://www.air-cosmos.com/article/cfmi-lance-le-programme-rise-24997>
- Emilie Dedieu, « *Comment Transavia va réduire sa consommation de carburant en optimisant l'altitude de ses avions* », industrie Techno, 27 avril 2021 : <https://www.industrie-techno.com/article/comment-transavia-va-reduire-sa-consommation-de-carburant-en-optimisant-l-altitude-de-ses-avions.64819>
- Eric Wattez, « *Tarmac : à Tarbes, ce recycleur de gros avions dit merci à la crise* », Capital, 18 septembre 2020 : <https://www.capital.fr/entreprises-marches/tarmac-a-tarbes-ce-recycleur-de-gros-avions-dit-merci-a-la-crise-1380851>
- François Duclos, « *Air France : un peu de vert sur le Toulouse-Orly* », Air Journal, 22 octobre 2014 : <https://www.air-journal.fr/2014-10-22-air-france-un-peu-de-vert-sur-le-toulouse-orly-video-5118257.html>

- A.A, « *expérimentation du premier vol long-courrier avec du biocarburant* », environnement magazine, 19 mai 2021 : <https://www.environnement-magazine.fr/mobilite/article/2021/05/19/134411/experimentation-premier-vol-longcourrier-avec-biocarburant>
- Thierry Blancmont, « *KLM : 1^{er} vol au monde avec du kérosène synthétique durable* », Air journal, 9 février 2021 : <https://www.air-journal.fr/2021-02-09-klm-1er-vol-au-monde-avec-du-kerosene-synthetique-durable-5225864.html>
- Frédéric Marsaly, « *en vol avec 97% de carburant renouvelable dans le réservoir* », Aerobuzz, 25 juin 2021 : <https://www.aerobuzz.fr/industrie/en-vol-avec-97-de-carburant-renouvelable-dans-le-reservoir/>
- Maxence Cordiez, « *le trafic aérien nous amène-t-il au crash?* », Cairn, 2019 : <https://www.cairn.info/revue-dard-dard-2019-1-page-75.htm>
- « *Les principaux freins au développement des biocarburants aéronautiques* », Transportshaker, 4 juillet 2019 : <https://www.transportshaker-wavestone.com/les-principaux-freins-au-developpement-des-biocarburants-aeronautiques/>

5° Rapports Publics

- Rapport Environnement 2020, DGAC : https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Rapport_Environnement_DGAC_Ann%C3%A9e_2020.pdf
- Mise en place d'une filière de biocarburants aéronautiques durables en France, Ministère de la transition écologique et solidaire 2020 : <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/ECV%20->

[%20Mise%20en%20place%20d%27une%20fili%C3%A8re%20de%20biocarburants%20a%C3%A9ronautiques%20en%20France.pdf](#)

- « Les biocarburants aéronautiques en France, perspectives de développement de leur production et de leur usage à l’horizon 2020. », Sylvie Banoun, Pierre Caussade et Claude Roy, Novembre 2015. : https://agriculture.gouv.fr/sites/minagri/files/cgaaer_15098_cgedd_010298-01_2015_rapport.pdf
- Communiqué No : 95 « les graves pertes se prolongeront en 2021 » IATA, 24 novembre 2020 : <https://www.iata.org/contentassets/98e73eed8f0642089447f885fbe06e3b/2020-11-24-01-fr.pdf>
- Les émissions gazeuses liées au trafic aérien en France en 2019, DGAC, octobre 2020 : https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/bilan_emissions_gazeuses_2019.pdf
- Sustainable aviation fuels guide, ICAO, décembre 2018 : https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/Sustainable%20Aviation%20Fuels%20Guide_100519.pdf
- Rapport annuel 2018 : « Le transport aérien : des efforts engagés encore à l’état d’expérimentation », Jean Paul Ceron, Climate Chance : <https://www.climate-chance.org/wp-content/uploads/2019/03/new-le-transport-aerien-des-efforts-engages-encore-a-letat-dexperimentation.pdf>

6° Sites Internet

- Techno-science : « Kérosène – Définition et Explications » : <https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Kerosene.html>

- Ifpenergiesnouvelles : « les biocarburants : définitions » : <https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/enjeux-et-prospective/decryptages/energies-renouvelables/quel-avenir-les-biocarburants>
- Expliseat : <https://expliseat.com/tiseat/>
- Ecologie gouv , “*Mise en œuvre de procédures de descente continue sur les grands aéroports en France*”, Ministère de la Transition écologique, 28 avril 2020 : <https://www.ecologie.gouv.fr/mise-en-oeuvre-procedures-descente-continue-sur-grands-aeroports-en-france>
- Thalès, « *Thales dévoile pureflyt, le cerveau de l’avion de demain* », 2 décembre 2019 : <https://www.thalesgroup.com/fr/group/journaliste/press-release/thales-devoile-pureflyt-le-cerveau-lavion-demain-0>
- Taxibot international, « *Narrow-Body Taxibot* » : <https://www.taxibot-international.com/narrow-body-taxibot>
- Linfodurable, “les carburants durables, indispensables pour décarboner l’aviation », 26 mars 2021 : <https://www.linfodurable.fr/environnement/les-carburants-durables-indispensables-pour-decarboner-laviation-24781>
- Site officiel de l’UE, « Mettre en œuvre le pacte vert pour l’Europe » : https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-european-green-deal_fr
- Site officiel de l’UE, “*Welcome to the SESAR Project*”: https://ec.europa.eu/transport/modes/air/sesar_en
- Notrechoix : <https://www.notrechoix.org>

7° Support Vidéo

- Débat : « *faut-il avoir honte de prendre l’avion* », Xavier Tytelman, 2 octobre 2020 : https://www.youtube.com/watch?v=ihY_w45_vEo

- La distillation du pétrole, PhyChim Profponsonnet, 17 octobre 2016 :
<https://www.youtube.com/watch?v=YhdQ4LiJRkI>
- Webinaire Biocarburants Aéronautiques, IAR-The French Bioeconomy Cluster, 12 mai 2021 :
<https://www.youtube.com/watch?v=3wUCv4tbrUM>

TABLE DES MATIERES

Remerciements.....	6
Sommaire.....	7
Tables des abréviations et des sigles utilisés.....	8
Introduction.....	10
§1. Contexte et actualités.....	10
§2. Objectifs et limites.....	11
§3. Définition des termes clés.....	11
a) Définition du terme innovation ou avancée technologique.....	11
b) Définition du terme biocarburant.....	12
c) Définition du terme gaz à effet de serre.....	12
§4. Histoire de l'aéronautique et de ses progrès.....	13
§5. Histoire des biocarburants.....	13
§6. Annonce de Plan.....	14
Partie 1 : Les évolutions technologiques et opérationnelles de l'industrie aéronautique face à un carburant historique en crise : le kérosène.....	16
Titre 1 : L'avenir du kérosène face à l'augmentation du trafic aérien.....	17
Chapitre 1 : une augmentation croissante du trafic aérien incompatible avec l'utilisation à long terme du kérosène.....	17
Section 1 : L'augmentation du trafic aérien justifiée par différents facteurs....	17
A. Une augmentation croissante du trafic aérien constatée.....	18
B. Les causes et facteurs explicatifs de l'augmentation croissante du trafic aérien.....	18
Section 2 : L'utilisation du kérosène : entre présent et avenir.....	20
A. Qu'est-ce que le kérosène ?.....	20
B. La taxation du kérosène au cœur des propositions de la Commission Européenne.....	23

Chapitre 2 : La montée en puissance de mouvements anti-avion en raison de l'impact écologique du transport aérien.....	25
Section 1 : Les émissions du transport aérien à différentes échelles.....	25
A. Les émissions CO2 du transport aérien à l'échelle française.....	25
B. Les émissions CO2 du transport aérien à l'échelle européenne et mondiale.....	26
Section 2 : Le développement de mouvement anti-avion.....	29
A. Le développement du Flight shame.....	29
B. Le développement de mouvement écolos à l'échelle française.....	30
Titre 2 : Des progrès technologiques et opérationnels de l'industrie aéronautique en réponse aux différents objectifs internationaux, jugés insuffisants	32
Chapitre 1 : La réglementation des émissions CO2 du transport aérien.....	32
Section 1 : L'engagement IATA/ATAG.....	32
Section 2 : Le programme CORSIA de l'OACI.....	33
A. Feuille de route et objectifs du programme CORSIA.....	33
B. Le programme CORSIA en France.....	35
Chapitre 2 : Pistes de recherche et avancées technologiques et opérationnels aéronautiques.....	37
Section 1 : Innover et repenser le design aéronef.....	37
A. La réduction de la masse de l'avion	37
B. L'optimisation du moteur et de la forme de l'avion	39
Section 2 : La mise en place de programmes d'optimisation des opérations aériennes.....	41
A. L'optimisation des opérations en vol.....	41
a. La procédure CDO : un processus d'abandon de la descente par pallier d'un avion.....	41
b. Le projet Fello Fly d'Airbus.....	42
c. Le projet Optilevel de Safety Line.....	43

d. Le projet SESAR	44
e. Le projet Pureflyt de Thalès.....	44
B. L'optimisation des opérations au sol.....	46
a. Electric Green Taxiing System de Safran.....	46
b. Wheeltug Electric Taxi System.....	46
c. Taxibot, Israel aerospace Industrie.....	48
Section 3 : Le recyclage des avions.....	49
Partie 2 : Vers un avion « réellement » décarbonné par l'utilisation de biocarburants aéronautiques.....	53
Titre 1 : Les biocarburants aéronautiques.....	54
Chapitre 1 : La production et l'utilisation des carburants durables alternatifs.....	54
Section 1 : La production des biocarburants aéronautiques.....	54
A. Les différentes générations de biocarburants.....	55
B. Le voies de traitement des biocarburants.....	55
a. La conversion des lipides.....	56
b. La conversion thermochimique.....	56
c. La conversion biochimique.....	57
C. Le processus de certification des biocarburants.....	59
Section 2 : Les vols de démonstration utilisant des biocarburants aéronautiques.....	63
A. Vol de démonstration : aviation commerciale.....	64
a. Projet Lab'line for the futur de Safran.....	64
b. Expérimentation du premier vol long-courrier.....	64
c. Premier vol au monde avec du kérosène synthétique durable....	65
B. Vol de démonstration : aviation légère.....	65
Chapitre 2 : Les différentes contraintes.....	67
Section 1 : La nécessité de modifier la Supply Chain.....	67
Section 2 : Une réglementation de plus en plus incitative à l'incorporation de biocarburants.....	68

A. La feuille de route française.....	69
a. Les grandes lignes de la feuille de route	69
b. Une chaîne logistique simple et économe.....	70
c. Mise en place de la TIRIB.....	70
B. L'implication européenne et mondiale au développement de filière de biocarburants aéronautiques	71
a. Pacte vert pour l'Europe (European Green Deal).....	71
b. Refuel EU – aviation.....	71
c. Niveau international.....	72
Titre 2 : Les différents enjeux des biocarburants aéronautiques.....	73
Chapitre 1 : Les enjeux pré-production.....	73
Section 1 : Les enjeux de la disponibilité de la ressource/ une production en pleine émergence et du drop in.....	73
A. L'enjeu de la disponibilité de la ressource.....	73
B. L'enjeu de drop in.....	74
Section 2 : L'enjeu économique de la production des biocarburants aéronautiques.....	75
A. Comparatif entre le coût du kérosène et le coût des biocarburants aéronautiques.....	75
B. La nécessité d'un soutien financier.....	78
Chapitre 2 : Les enjeux post-production.....	79
Section 1 : L'enjeu de la durabilité des biocarburants aéronautiques.....	79
Section 2 : L'impact environnemental et énergétique de l'utilisation des biocarburants.....	81
Conclusion.....	83
Bibliographie.....	85
Table des matières.....	92
Résumé.....	96

RESUME

Du fait de la crise climatique, le transport aérien vit un véritable tournant. Entre révolution technologique et déploiement de nouvelles filières de carburants d'aviation durable, c'est un réel défi que le secteur aérien a décidé de relever. En effet, depuis quelques années, le changement climatique inquiète et met en péril les générations à venir. Comment l'industrie aéronautique arrivera-t-elle à atteindre les objectifs ambitieux, visant à réduire les émissions de CO₂ ? Les moyens déjà mis en place sont-ils suffisants et sont-ils durables ? Tel est le sujet d'étude du présent mémoire par l'analyse du plan d'action mis en place par l'industrie aéronautique afin de lutter contre le changement climatique.

MOTS CLES

Révolutions technologiques et opérationnelles ; Biocarburants aéronautiques ; Émissions CO₂ du transport aérien ;

SUMMARY

Due to the climate crisis, air transport is experiencing a real turning point. Between the technological revolution and the deployment of new sustainable aviation fuels, it is a real challenge that the airline industry has decided to take up. Indeed, for several years now, climate change has been causing concern and endangering future generations. How will the aviation industry meet the ambitious targets for reducing CO₂ emissions? Are the means already in place sufficient and sustainable? This is the subject of this thesis, which analyses the action plan put in place by the aviation industry to combat climate change.

KEYWORDS

Technological and operational revolutions; Sustainable Aviation Fuel; CO₂ emissions from air transport;