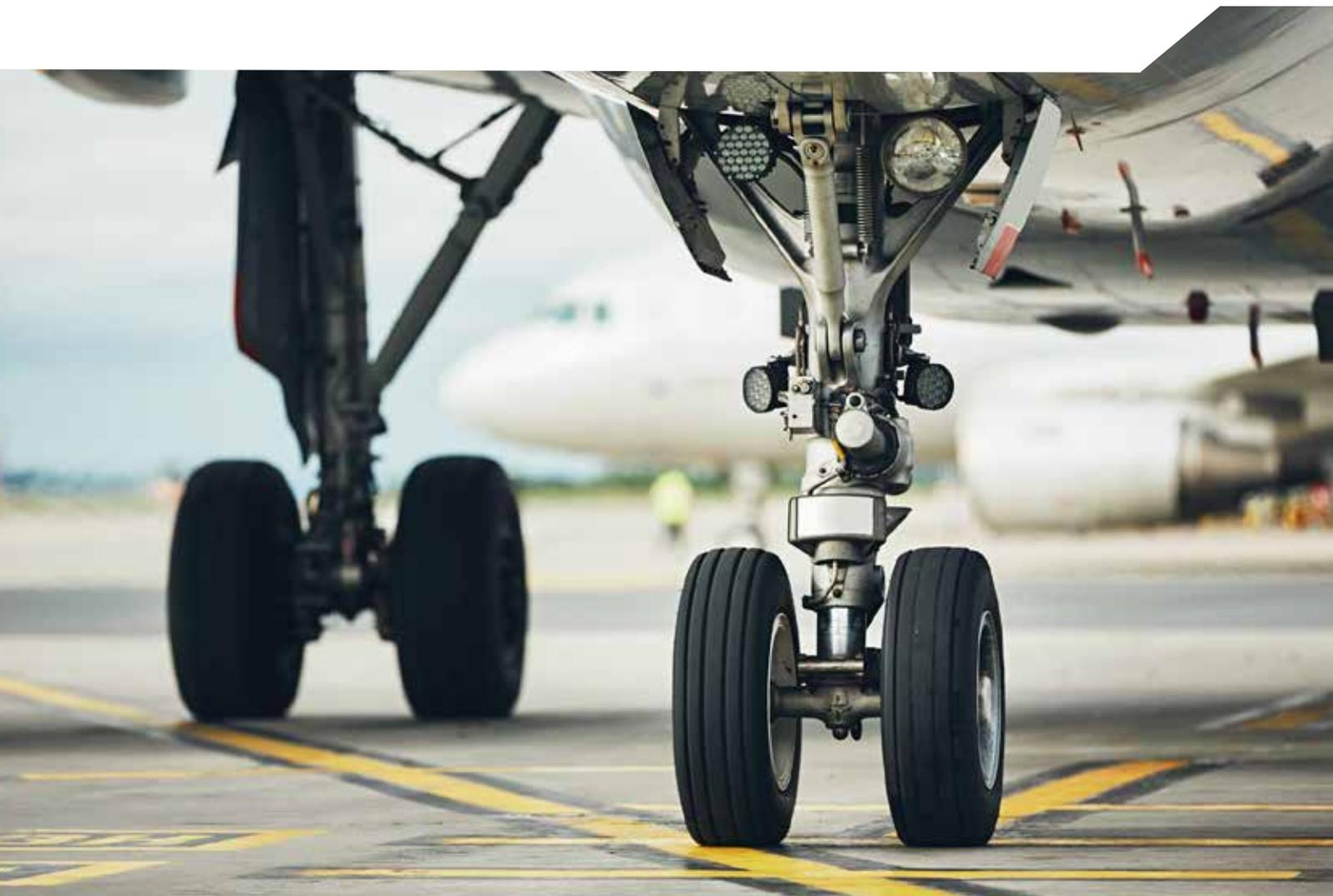


# Innover et se rénover : plan de vol pour une industrie aéronautique durable

*Florian Gandon – Corentin Lefloch*

*Premier Prix des Usaire Student Awards 2020 – Be Green, Keep Flying!*





## Résumé

**I**nnover et se rénover : ces deux termes structurent le programme de l'industrie aéronautique pour achever sa transition verte d'ici 2050.

D'une part, une aviation écologique constitue avant tout un puzzle technologique, dont les pièces sont de multiples innovations qui devront être associées au cours des deux prochaines générations d'appareils. D'autre part, le secteur aérien a atteint un tel niveau de complexité que l'assemblage de ce

puzzle ne passera que par une refonte de l'organisation du secteur.

De la création du « Conseil International pour une Aviation Durable » à l'instauration de primes à la casse, en passant par la généralisation de transition bonds et innovations de rupture, ce Livre Blanc propose (i) une feuille de route technologique ambitieuse et (ii) un nouveau cadre institutionnel, économique et juridique pour mettre en place un transport aérien durable à échéance 2050.

## Sommaire

Introduction .....	3
I. L'avion vert, un puzzle aux mille et une pièces technologiques.....	4
1. Un futur en deux horizons.....	5
a. 2030 : une première étape vers l'avion vert.....	5
b. 2050 : une rupture totale avec l'aviation actuelle.....	5
2. Les quatre piliers technologiques de l'avion de demain.....	6
a. De l'optimisation maximale des motorisations actuelles à l'arrivée de systèmes disruptifs.....	6
b. Les biokérosènes, clef de voûte de l'avion vert ? .....	7
c. Un processus de production au service de l'efficacité environnementale.....	8
d. L'intégration de la dimension environnementale dans la gestion des opérations aériennes.....	9
II. Une profonde réorganisation du secteur pour assembler le puzzle technologique.....	10
1. Coopération sectorielle à l'échelle internationale .....	11
a. Coopération intra-sectorielle .....	11
b. Coopération extra-sectorielle .....	12
2. Harmonisation internationale des réglementations environnementales.....	13
a. Accompagner le chemin vers une aviation neutre : la compensation carbone.....	13
b. La transition par le changement des comportements : la généralisation des labels.....	13
3. Coopération financière régionale.....	13
a. Financer un effort en R&D sans précédent.....	13
b. Un modèle économique qui doit s'adapter à la mutation du secteur.....	14
Remerciements et biographies.....	15
Bibliographie .....	16

# Introduction

La pandémie de Covid-19 met en exergue l'extrême sensibilité du secteur aérien à la dimension environnementale. Alors que l'enjeu écologique mobilise la communauté internationale de manière croissante, l'industrie aérospatiale civile et militaire est particulièrement ciblée, comme le symbolise le mouvement d'origine suédoise "Flygskam". Représentant 2% des émissions de CO2 mondiales, elle doit prendre pleinement part à la transition écologique.

Dans ce contexte, l'Organisation de l'Aviation Civile Internationale (OACI) a établi lors de sa 37e assemblée un double-objectif ambitieux : assurer une croissance neutre en carbone à partir de 2020 et atteindre une amélioration annuelle de la consommation des aéronefs de 2% jusqu'en 2050.

Ce mouvement est d'ores et déjà en cours depuis le premier choc pétrolier. La réduction des émissions est en effet intimement liée à celle de la consommation de kérosène, permettant des économies d'exploitation massives. Ainsi, l'amélioration incrémentale des structures traditionnelles d'aéronefs a permis d'accroître de 80% leur efficacité énergétique par rapport aux années 60.

Cependant, la limite physique des technologies existantes semble sur le point d'être atteinte. Un nouveau paradigme doit donc être adopté afin d'accélérer les efforts du secteur, dans un contexte de croissance structurelle du trafic aérien, malgré l'impact négatif de court-terme de la crise actuelle. La promotion d'une industrie aéronautique verte devient dès lors un facteur majeur de compétitivité,

dans un marché au cœur de la souveraineté des états et bouleversé par l'essor d'acteurs émergents, notamment chinois.

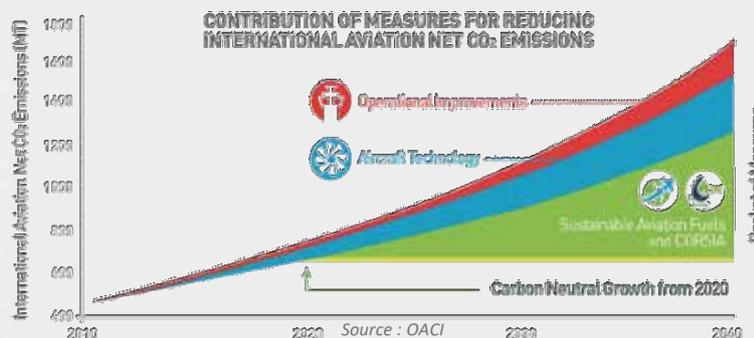
*Ce Livre Blanc a ainsi vocation à proposer une organisation du secteur à l'échelle internationale, permettant de relever le défi technologique sans précédent auquel il fait face.*

Il fait consensus que seul un panier complet de mesures, incluant la structure des aéronefs, la motorisation, les carburants et les opérations en vol contribuera à l'avènement d'un transport aérien écologique. Or, la faible maturité de la plupart de ces technologies repousse à plusieurs années les

grands choix stratégiques pour les deux prochaines générations d'avions civils. La première partie de ce rapport est ainsi destinée à présenter et évaluer les principales pièces technologiques du

puzzle qui permettra d'atteindre les objectifs fixés par l'OACI.

Comme tout puzzle, celui-ci doit être assemblé avec cohérence. Par conséquent, la seconde partie aura pour ambition de présenter un cadre institutionnel, légal et financier de l'industrie aéronautique à l'échelle internationale, qui permettra d'acter les grandes orientations stratégiques des prochaines années et accompagner la filière dans la mutation profonde de son modèle économique. Celui-ci ne pourra se cantonner aux seules émissions de CO2. Les rejets sonores et de NOx, la qualité de l'air local (LAQ) et la contribution sociale de la filière devront faire partie intégrante de cette réflexion.



## **Partie 1**

-

**L'avion vert, un puzzle aux mille  
et une pièces technologiques**

## Partie 1 - L'avion vert, un puzzle aux mille et une pièces technologiques

**L**es grandes mutations de l'aviation ont toujours été engagées par un bouleversement technologique. Les frères Wright ont, avec le développement du moteur à combustion, pu concrétiser le rêve Icarien d'un homme volant. De la même manière, l'avènement du moteur à réaction, à travers le De Havilland Comet, a permis le décollage du transport aérien commercial.

Aujourd'hui, l'industrie aéronautique doit engager une nouvelle révolution : celle de la neutralité environnementale. A la lumière du passé, cette mutation ne pourra donc être actée sans un réel travail d'innovation technologique. Celui-ci doit être pensé à travers deux dimensions : temporelle et fonctionnelle.

### 1. Un futur en deux horizons

Le cycle de développement d'un programme aéronautique et les niveaux de maturité inégaux entre les différentes technologies nécessaires pour atteindre une neutralité écologique dessinent un chemin en deux étapes.

#### 2030 : une première étape vers l'avion vert

Afin de promouvoir un soutien public jusque-là sans précédent, les discours politiques placent l'avion « zéro émission » comme élément central des stratégies nationales. Bruno Le Maire annonce en ce sens « un avion neutre en carbone à l'horizon 2035 », grâce à des injections massives de capitaux et à la réduction globale du temps de développement des dernières générations d'appareils. Celui-ci est, à titre de comparaison, passé de plus d'une décennie à sept ans pour l'A350.

Cependant, l'industrie aéronautique est confrontée à de multiples problématiques, pouvant remettre en question l'achèvement d'un tel projet dans le temps imparti. L'inégale maturité des technologies envisagées en est le principal obstacle. A titre d'exemple, l'ébauche proposée par le ministre de l'économie français se base largement sur le recours à l'hydrogène, carburant dont la production décarbonée reste aujourd'hui extrêmement limitée et complexe. Même si, à l'image de l'Allemagne, de nombreux pays ont récemment engagé un plan d'industrialisation de sa production, les contraintes techniques comme la forte consommation électrique de l'électrolyse ou la certification d'un nouveau mode de propulsion sont autant d'écueils qui pourraient accroître à court terme l'empreinte écologique d'un tel avion.

Par conséquent, cette première génération post-COVID ne pourra reposer intégralement sur des technologies de rupture pour atteindre ces objectifs. À l'image de l'intégration des matériaux composites depuis les années quatre-vingt-dix, il apparaît plus réaliste et pertinent de pousser au

maximum les technologies actuelles, parallèlement à une introduction progressive des plus novatrices. Cette stratégie permettra de gagner en maturité sans risquer la mise en péril d'un projet industriel trop ambitieux.

L'avion de 2035 ne sera alors en apparence pas en rupture totale avec les générations précédentes, mais de nombreuses innovations technologiques y feront leur apparition, comme sur l'ecoDemonstrator de Boeing. L'amélioration incrémentale des motorisations et structures d'aéronefs, telle la mise en place de profils laminaires étudiée dans le cadre du projet Blade d'Airbus, l'optimisation des opérations, l'utilisation d'une part croissante de biocarburants et d'hydrogène et un éventuel appareil civil régional électrique permettront ainsi de réaliser un pas significatif vers un transport aérien « 0 émission ».

#### 2050 : une rupture totale avec l'aviation actuelle

A l'horizon 2030, l'ensemble des technologies de rupture jugées aujourd'hui comme les plus prometteuses pour la transition verte de l'industrie aéronautique auront atteint un stade de maturité avancé. Il sera dès lors possible d'identifier avec exactitude la solution, ou plus probablement l'ensemble de solutions, le plus pertinent pour atteindre la neutralité environnementale du transport aérien sur l'intégralité du cycle opérationnel.

La méthode de propulsion constituera l'élément central de cette mutation. Ainsi, en une décennie, les filières électriques, hydrogènes et des biocarburants auront atteint une nouvelle dimension dans toutes les industries. Le secteur pourra donc s'engager avec assurance dans une ou plusieurs de ces technologies, leurs implications techniques, économiques et environnementales étant désormais clairement identifiées. Ce choix aura également un impact majeur sur la relation industrielle entre constructeurs et fournisseurs, qui doit d'ores et déjà être anticipée. A titre d'exemple, la complexité de mise en œuvre d'une motorisation

à base d’hydrogène imposera de lier davantage moteur, réservoir et circuit carburant.

La structure des aéronefs pourrait également faire l’objet de choix profondément disruptifs, sur des considérations purement physiques. Ainsi l’architecture de l’aile volante est particulièrement prometteuse. Avec le projet Maveric, Airbus vise à approfondir cette solution et estime les gains potentiels de consommation de kérosène à 20%. Bien que cette architecture soit déjà mise en œuvre dans un cadre militaire avec le B-2 Spirit, l’implémenter dans le civil nécessitera de relever de nombreux défis. Au-delà de la certification d’une architecture novatrice, un tel appareil conduira à repenser entièrement l’expérience des passagers. Les infrastructures au sol devront également être réaménagées pour ces avions, avec des dimensions et accès spécifiques.

Un autre concept porteur est l’ingestion de couche limite, notamment via la propulsion distribuée. Une telle architecture aura pour effet d’augmenter le rendement propulsif du moteur, réduisant ainsi la consommation d’énergie. Le projet Aurora D8 de la NASA et du MIT annonçait en ce sens des gains de 50%. Cependant un tel système sera extrêmement complexe à mettre en place. Tout d’abord, la modélisation complète des interactions entre le fuselage et les moteurs sont actuellement d’un coût trop important pour en permettre le développement, rendant ainsi l’optimisation aérodynamique encore très limitée. Étant donnée la configuration, chaque modification sur la cellule aura un impact sur le moteur et vice versa, empêchant de « plugger » des réacteurs sur un avion, comme il est aujourd’hui d’usage. Il sera donc une nouvelle fois nécessaire de repenser l’organisation motoriste-constructeur au cours de son développement.

L’ensemble de la chaîne de valeur aéronautique se trouvera ainsi bouleversée par ces évolutions, aussi bien techniques qu’industrielles. Dès lors, leur mise en place requiert un horizon postérieur à 2035.

## 2. Les quatre piliers technologiques de l’avion de demain

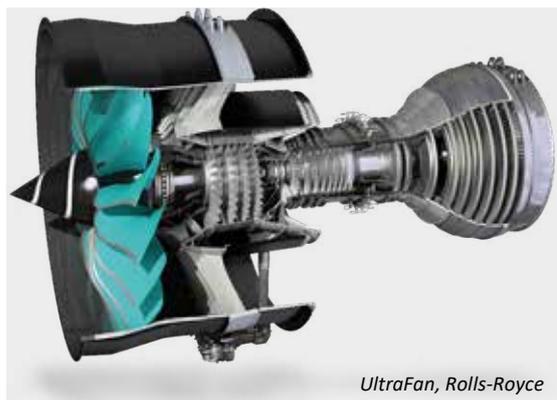
Face à l’absence d’une solution miracle, un transport aérien zéro émission représente un défi de taille pour le secteur. Garantir la bonne réussite de la feuille de route fixée par l’OACI implique une révolution technologique, autour de quatre axes distincts et un domaine transversal tout aussi fondamental : le digital. Ceux-ci auront pour

objectif de couvrir l’ensemble du cycle de vie d’un aéronef, de sa production à son recyclage, tout en prenant en considération les impacts indirects induits par chaque solution.

### De l’optimisation maximale des motorisations actuelles à l’arrivée de systèmes de propulsion disruptifs

Le système propulsif apportera la plus grande contribution à la révolution du transport aérien. Cependant, celui-ci étant d’une complexité extrême, il constitue le pilier le plus exigeant à moderniser et dont les orientations prises seront les plus structurantes.

La première étape est la mise en fonctionnement des moteurs à très haut taux de dilution comme l’Ultra High By-pass Ratio (UHBR) de Safran ou l’UltraFan de Rolls-Royce. Ces systèmes de propulsion représentent la dernière étape d’innovation incrémentale des moteurs à réactions, avec un gain de consommation de 5 à 10%. Leurs performances ne permettront pas d’atteindre la neutralité environnementale de l’aviation sans un recours massif au biokérosène. Il en est de même pour le Counter Rotating Open Rotor (CROR). Bien qu’affichant des performances supérieures, avec une réduction de 25% à 30% de la consommation, le manque de maturité et le bruit engendré par cette technologie rendent son utilisation peu probable en l’état actuel. Cette technologie avait par ailleurs d’ores et déjà été abandonnée dans les années 80 pour des raisons similaires.



UltraFan, Rolls-Royce

Bien que ces systèmes de propulsion représentent une avancée majeure pour l’industrie, l’accélération de l’agenda environnemental associé à la pandémie de Covid-19 met d’autant plus en avant des solutions marquant une rupture technologique d’autant plus forte. L’électrique peut alors apparaître comme la solution idéale. De nombreux projets ont ainsi émergé pour étudier la faisabilité d’un tel mode de propulsion. Avec l’E-Fan et l’E-Fan X, Airbus vise à acquérir une réelle

expérience du vol électrique. Wright Electric, en collaboration avec EasyJet, s’est quant à lui fixé pour ambition de développer un appareil entièrement électrique de plus de 150 places.

Or, ces projets font face à deux problématiques principales. D’une part, il faudrait une révolution du stockage d’électricité pour que cette solution soit généralisée à l’ensemble des lignes. En effet l’énergie massique des batteries est quatre à six fois plus faible que celle du kérosène. Celles-ci ne s’allégeant pas au cours du trajet, la masse de batteries à emporter serait encore supérieure en pratique, en comparaison des motorisations aujourd’hui en place. D’autre part, même si un tel avion voyait le jour, son impact écologique demeurerait dépendant de chaque mix énergétique national. Dans la configuration la moins avantageuse, il en résulterait ainsi un aéronef encore plus polluant qu’en l’état actuel. Il faut également prendre en compte son impact sur le réseau électrique. A l’heure où l’ensemble des moyens de transport s’électrifient, la charge pour les réseaux de production et de transport s’allourdira d’autant plus que les méthodes de production durables peinent à se développer.

Malgré l’ensemble de ces éléments, la propulsion électrique tient toute sa place dans l’aviation verte. La puissance électrique des aéronefs ne cesse de croître depuis 20 ans, tendance amenée à se poursuivre. Il est donc primordial de développer de nouveaux modes de production in-flight d’électricité, afin d’approvisionner tous ces systèmes de façon la plus économe possible en énergie. Par conséquent, la propulsion 100% électrique apparaît plus adaptée pour des modes de transport intra-urbains et régionaux. Le projet hybride ATEA d’Ascendance Flight Technologie ou entièrement électrique City Airbus en sont les parfaits exemples, soulignant au passage le rôle central de l’aérien dans la mobilité des populations.



City Airbus, Airbus

Suite à ce constat, les moteurs à hydrogène s’imposent progressivement comme le mode de propulsion le plus prometteur, notamment pour les vols moyen et long-courriers. Qu’il soit consommé

via des piles à combustible pour faire fonctionner des moteurs électriques, ou brûlé dans des turboréacteurs, ce carburant tient pour principal avantage une énergie stockée par unité de masse parmi les plus élevées. De plus, son utilisation dans des turbines à gaz ne nécessitera que de faibles modifications dans les moteurs actuels, principalement au niveau de la chambre à combustion. Certains projets comme le moteur AHEAD de la TU Delft explorent même des concepts hybrides kérosène-hydrogène.

L’hydrogène présente cependant deux grandes contraintes, qui nécessiteront un fort investissement pour être résolues. Tout d’abord, l’énergie stockée par unité de volume est faible à température et pression standards. Il doit ainsi être conservé en vol et au sol soit sous haute pression, de 300 à 400 bars, soit à très faible température, de l’ordre de  $-250^{\circ}\text{C}$ . Émergent dès lors des problématiques de masse induite par le stockage, pour les bombes ou le système de refroidissement. Ensuite, l’origine de la production fait l’objet de grandes incertitudes. S’il est produit par électrolyse, et que l’énergie électrique pour entraîner la réaction n’est pas d’origine renouvelable, le bilan carbone sera bien plus lourd qu’avec du kérosène classique. Enfin, il est important de prendre en compte l’ensemble des conséquences de ce type de moteur. Bien qu’il ne rejeterait que de l’eau, les effets induits par une forte quantité d’H<sub>2</sub>O à haute altitude sont encore mal connus. En effet, sa présence sous forme gazeuse et l’augmentation de la taille des traînées rendent son potentiel de réchauffement global (PRG) difficilement mesurable. La présence de cette molécule à haute altitude pourrait également entraîner des réactions chimiques dont l’impact est encore très incertain.

### Les biokérosènes, clef de voûte de l’avion vert ?

Les motorisations électriques et à base d’hydrogène suscitent énormément d’espoirs en faveur de la transition verte du secteur. Cependant, la maturité de ces technologies de propulsion alternatives ne sera pas encore suffisante afin de permettre leur utilisation systématique à court et moyen terme. En ajoutant à cela la durée de vie encore conséquente de la flotte actuelle, le besoin en kérosène va rester colossal dans les années à venir. C’est pourquoi les biokérosènes drop-in, i.e. utilisables comme du kérosène « classique », auront une place primordiale dans la décarbonisation du secteur.

Plusieurs processus permettent de produire du biokérosène. Le procédé de Fischer-Tropsch (FT)

contribuerait à réduire de 50% les émissions de CO<sub>2</sub> pour une production basée sur les déchets municipaux, pouvant même atteindre 90% en utilisant les résidus agricoles ou forestiers. Ce procédé est déjà certifié, bien qu’il ne soit pas suffisamment mature pour un développement à très grande échelle, notamment du fait de difficultés à maintenir un rendement élevé. De plus, il requiert des Capex extrêmement importants. Malgré ces contraintes, de nombreuses entreprises se sont lancées dans son développement et sa production, à l’image de Fulcrum BioEnergy, qui a pour objectif de produire 40 millions de litres à partir de 2020.

Un second procédé, l’Hydroprocessed Esters and Fatty Acids (HEFA), est à l’heure actuelle le plus avancé. En effet, son Technology Readiness Level (TRL) est de 6 à 9 en fonction de l’origine des matières premières. Celui-ci promet une réduction des émissions de CO<sub>2</sub> certes plus modeste, de 40% à 70% en utilisant des graisses animales ou des huiles végétales usagées, mais permet d’établir des synergies avec la production de biocarburants routiers. En outre de nombreux tests effectués en conditions réelles ont pu prouver la pertinence de ce carburant et l’industrialisation du procédé a démarré. L’entreprise finlandaise Neste Oil Corporation s’est par exemple fixée comme objectif d’en produire 1 million de tonne par an à partir de 2022. Ce procédé est d’autant plus prometteur qu’il pourrait permettre durant la décennie de produire des biocarburants à partir d’algues ou de levures. Bien qu’il ait levé d’immenses espoirs avant son abandon par Solazyme, de nombreuses entreprises continuent leurs recherches afin de pouvoir en commercialiser.

D’autres méthodes permettent également de synthétiser du biokérosène, comme la Synthesized Iso-Paraffins (SIP), utilisée pour certains vols Air France entre Paris et Toulouse ou l’Alcohol-to-Jet (ATJ). Cependant ces procédés ont une maturité moins avancée que FT ou HEFA, et leur commercialisation semble encore assez lointaine.

Quel que soit le processus de fabrication, les biokérosènes soulèvent enfin des interrogations majeures sur leur impact écologique. Tout d’abord il est à l’heure actuelle impossible de faire voler un avion uniquement avec du biokérosène, le taux maximum de mélange s’élevant jusqu’à 50% pour les procédés FT et HEFA. Ensuite, l’intensité capitalistique de leur production, à laquelle s’ajoute un cours du pétrole historiquement bas, rend leur rentabilité improbable à moyen terme. Il est ainsi estimé que leur prix de vente ne pourra être

inférieur à celui du kérosène traditionnel avant au mieux 2035 selon la tendance actuelle, limitant leur potentiel de commercialisation sans soutien public. Enfin, il est primordial de prendre en compte leur impact écologique et social global. Si le développement de cette filière conduit à un accroissement de la déforestation et/ou à une utilisation plus grande de produits chimiques afin de garantir les rendements, leur utilisation pourraient avoir un impact écologique bien plus faible qu’espéré. Il n’est également pas concevable de mettre en concurrence les surfaces de production de biokérosène avec celles permettant l’alimentation des populations. Pour conclure, le développement de cette énergie pourrait redéfinir certaines dynamiques géopolitiques. Avec une filière de biocarburants entièrement souveraine, les besoins en pétrole importé seraient réduits à leur strict minimum, réduisant d’autant le poids sur la scène internationale des pays exportateurs de pétrole. Ainsi, l’armée américaine s’approvisionne depuis plusieurs années en biokérosène auprès d’Honeywell UOP et s’affirme ainsi comme un de leur principaux partenaires.

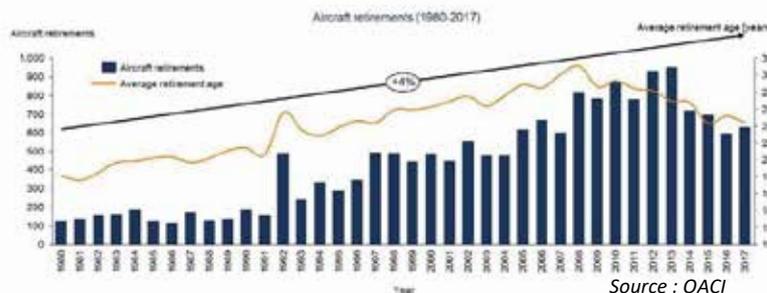
### **Un processus de production au service de l’efficacité environnementale**

La production industrielle, de par l’imperfection de ses processus, est source de défaillances environnementales importantes. L’émergence de l’industrie 4.0, à travers notamment l’Internet of Things (IoT) et l’impression 3D, est une voie d’amélioration majeure pour l’ensemble du secteur.

L’impression 3D nourrit de grands espoirs pour la production de tous types de composants. Les imprimantes sont de plus en plus performantes à l’image de l’Arcam spectra H de GE Additive et paraissent même prêtes à produire en série des pièces aéronautiques. Dès 2018, Stelia Aerospace a réussi à concevoir un démonstrateur de panneau de fuselage métallique avec cette technique dans le cadre du projet DEFACTO. Ce procédé permet alors de produire une surface plus complexe afin de mieux répartir les efforts et gagner en masse. Depuis, Liebherr-Aerospace a lancé l’assemblage en série de supports pour trains d’atterrissages avant par fabrication additive. Pour une telle technologie, le rapport buy-to-fly, i.e. la quantité de matière achetée sur la quantité de matière qui sera amenée à voler, est proche de 100%. Les gains économiques et écologiques induits sont alors conséquents dès la production, tout en réduisant la consommation de matière première et la masse en vol.

L’intégration de l’IoT à la chaîne de production est également un facteur de performance environnementale nouveau. Par la création d’un “digital twin”, le processus de fabrication peut être rationalisé et limiter de manière drastique les défaillances de qualité, par extension des principes du toyotisme.

Enfin, pour réduire l’impact environnemental à zéro, un recyclage total des aéronefs et des pièces détachées est primordial. C’est le service que propose Tarmac Aerosave sur son site de Tarbes-Lourdes-Pyrénées, annonçant un recyclage de près de 92% des appareils. Alors que de nouveaux modes de production se développent, il est indispensable d’accroître ce taux. D’une part, les aéronefs regorgent de matériaux précieux dont l’utilisation s’étend bien au-delà de l’aéronautique et le nombre d’avions mis hors service est amené à croître considérablement. D’autre part, un tel service est le fruit d’un réel savoir-faire et pourvoyeur d’un nombre conséquent d’emplois directs et indirects.



Cependant pour permettre une valorisation de 100% de la masse des aéronefs, il est nécessaire de prendre en compte dès les premiers stades de développement la fin de vie de nos appareils. C’est une condition sine qua non pour permettre une aviation réellement verte, qui, au-delà de la contrainte apparente, pourra générer une vraie valeur économique et sociale à long terme.

### L’intégration de la dimension environnementale dans la gestion des opérations aériennes

Depuis l’avènement de l’aviation commerciale, les opérations aériennes ont toujours eu pour objectif principal la garantie d’un niveau de sécurité maximal. Cette doctrine doit désormais être

enrichie d’un second volet : l’optimisation environnementale.

En ce sens, de nouvelles solutions sont en cours de développement afin de rationaliser l’Air Traffic Flow Management (ATFM). C’est l’objectif des programmes américain NextGen et européen SESAR. En se basant sur la quantité croissante de données disponibles et des algorithmes d’intelligence artificielle, il devient possible d’optimiser significativement la gestion du trafic. Une vue globale de celui-ci permet dès lors de gérer au mieux leur trajectoire et ainsi optimiser leur temps de vol.

Combiné avec des solutions permettant l’optimisation en fonction des conditions extérieures comme la météo, l’algorithme OptiFlight de la start-up Safety Line, ou directement le FMS PureFlyt de Thales permettent un gain de

consommation de l’ordre de 5 à 10%. Mais surtout, ces solutions pourraient permettre de réduire les contraintes sur le

développement de l’avion électrique ou à hydrogène, accélérant sa mise en service. La réduction des émissions sonores et l’amélioration de la qualité de l’air local (LAQ) doivent également être placées au cœur de la modernisation des systèmes d’ATFM.

Enfin, les opérations au sol auront aussi leur place dans le développement de l’avion vert. Que ce soient au niveau du roulage comme l’Electric Green Taxiing System de Safran, permettant aux avions de réduire leur consommation au sol, ou dans la maintenance prédictive et l’impression 3D afin de réduire les déchets, les évolutions impacteront l’ensemble du cycle de l’avion, en vol comme au sol.

**A**insi deux constats doivent être tirés de l’étude des principales évolutions technologiques à venir. D’une part, il n’existe pas, et il n’existera pas, de solution miracle afin de développer l’avion vert. Celui-ci sera développé grâce à la mise en place de systèmes divers afin de répondre à des objectifs tout aussi divers tels que le transport intra-urbain et les vols moyen ou long-courriers. D’autre part, ces systèmes se baseront sur des énergies d’origines nouvelles, et dont l’impact écologique ne pourra être uniquement maîtrisé par le transport aérien. Pour que l’avion vert prenne pleinement son envol, il faut que la source d’où il tire son énergie, électrique, hydrogène ou biokérosène, soit verte également. Les choix de développement devront donc être intégrés dans une démarche globale afin de ne pas engendrer de contre-sens écologiques.



## Partie 2

-

**Une profonde réorganisation du  
secteur pour assembler le puzzle  
technologique**



## Partie 2 – Une profonde réorganisation du secteur pour assembler le puzzle technologique

**L**a première partie a mis en avant le véritable défi technologique que représente une aviation neutre en carbone. La seconde a donc vocation à présenter une nouvelle organisation du secteur, qui permettra de choisir et implémenter ces grandes orientations techniques, en y intégrant les considérations écologiques, économiques et sociales.

Cette mutation de l'industrie aéronautique doit répondre à trois contraintes structurelles :

- Une contrainte sectorielle, celle-ci se trouvant dans la diversité et l'interdépendance des acteurs. Seule une stratégie coordonnée au niveau mondial, entre industriels et entités publiques, permettra d'atteindre dans les délais impartis les objectifs fixés par l'OACI ;
- Une contrainte réglementaire, avec des législations environnementales hétérogènes en fonction des zones économiques, favorisant les effets d'aubaine et distorsions de marché ;
- Une contrainte économique, portant sur le financement d'une transition verte à forte intensité capitalistique dans un premier temps et la rentabilité de nouveaux modèles économiques induits par ces mutations dans un second temps.

Au vu de l'ensemble de ces contraintes, l'organisation du secteur apparaît au moins aussi fondamentale que l'innovation technologique pour parvenir à une croissance durable du secteur aérien à partir de 2020. Nos recommandations ont ainsi vocation à répondre aux trois contraintes précitées.

### 1. Coopération sectorielle à l'échelle internationale

De par son prisme mondial et la variété de ses acteurs, le premier pilier de l'organisation du transport aérien pour atteindre son ambition verte passe indéniablement par une coopération de l'ensemble des parties prenantes à l'échelle internationale.

#### Coopération intra-sectorielle

Du fait de la complexité technologique d'un aéronef, la chaîne de valeur aéronautique est par essence composée d'une multitude d'industriels, répartis sur l'ensemble du Globe et dépendants des orientations stratégiques de grands décideurs.

Or, la transition verte du transport aérien impose des choix entre des technologies de rupture totalement opposées. A titre d'exemple, le recours par Airbus et Boeing aux motorisations électriques ou à base d'hydrogène impactera directement les motoristes, mais aussi les énergéticiens, exploitants aéroportuaires et structures de coûts des compagnies aériennes. C'est ce que l'on appelle l'effet de sentier. Des choix divergents entre les constructeurs auraient pour conséquences de diluer les investissements et d'engendrer à terme des surcoûts exorbitants, mettant en péril le

modèle économique du transport aérien. De plus, cela ralentirait massivement la mutation verte du secteur. Il est donc indispensable que les principaux donneurs d'ordres se concertent afin d'aligner leurs grands choix technologiques.

Nous proposons ainsi la création d'un "Conseil International pour une Aviation Durable" (CIAD), sur un modèle proche de celui du Conseil pour la Recherche Aéronautique Civile (CORAC) français. Il aura pour mission de parvenir à un consensus sur les grandes orientations technologiques mentionnées dans la première partie.

Ses principales caractéristiques sont les suivantes :

- Composé d'industriels couvrant l'ensemble de la chaîne de valeur aéronautique, ainsi que de représentants d'organismes institutionnels et de recherche ;
- Placé sous l'égide de l'OACI, en charge de sa coordination ;
- Le Comité de Protection de l'Environnement en Aviation (CAEP) émettra un avis consultatif indépendant sur chaque décision du CIAD, afin d'évaluer son adéquation avec les objectifs climatiques et les Standards & Recommended Practices (SARPs) de la Convention de Chicago.

Le CIAD aura pour missions de :

- S'accorder sur un agenda commun pour les deux prochaines générations d'appareils (environ 2035 et 2050) ;
- Établir un consensus autour des grands choix technologiques (structure, moteur...) d'ici 2025 pour la prochaine génération d'avions civils ;
- Harmoniser à l'échelle mondiale les réglementations régionales relatives à l'environnement ;
- Émettre des recommandations de financement des technologies d'avenir à destination des industriels et organismes publics nationaux et régionaux.

### Coopération extra-sectorielle

L'enjeu environnemental mobilise l'ensemble des secteurs de l'économie et le transport aérien est par de multiples aspects lié à d'autres industries. La reconversion de l'aéronautique doit donc être pensée en y associant les autres filières.

Le développement de certaines technologies peut ainsi faire l'objet de synergies avec d'autres industries, notamment des transports. La filière hydrogène en est l'une des meilleures illustrations, dont la technologie HEFA est également applicable aux véhicules routiers. C'est le sens du plan de 9 milliards d'euros pour la filière hydrogène annoncé par Angela Merkel en juin 2020. Il est donc nécessaire d'encourager des programmes multisectoriels de R&D, afin d'amortir les coûts de recherche sur plusieurs industries, accélérer les calendriers de développement et parvenir à une plus grande efficacité opérationnelle.

De plus, une meilleure empreinte économique et environnementale des flux humains et matériels passe par une adaptation efficace de l'offre de transport à la demande, à travers la multimodalité. Dans cette optique, la modernisation de l'infrastructure aéroportuaire doit être une priorité, connectant les différentes solutions de transport entre elles et répondant à une réelle demande citoyenne. Dans cette logique, l'Union Européenne a lancé dans le cadre du plan Horizon 2020 un programme d'investissement afin d'améliorer l'interconnexion entre les divers modes de transport autour des aéroports continentaux.

## 2. Harmonisation internationale des réglementations environnementales

La législation a toujours accompagné les mutations de l'industrie aérospatiale, que ce soit l'assouplissement progressif des certifications ETOPS ou la libéralisation du marché du transport aérien à partir du "Deregulation Act" de 1978. Le deuxième pilier indispensable à une organisation performante de la transition verte du secteur est ainsi associé au cadre réglementaire. Ses deux caractéristiques principales seront l'harmonisation à l'échelle internationale et une philosophie incitative plutôt que punitive.

Premièrement, afin de renforcer la sécurité du transport aérien et assurer une concurrence équitable entre l'ensemble des acteurs du secteur, l'industrie aéronautique a depuis des décennies favorisé la convergence de son cadre réglementaire sur le plan international, sous l'impulsion notamment de la Federal Aviation Administration (FAA) et de l'European Aviation Safety Agency (EASA). Or, l'engagement écologique à double-vitesse de certains états représente une menace de régionalisation des législations environnementales aéronautiques, avec à la clef un réel risque de distorsion de marché. Seule une coordination des normes légales au niveau mondial permettra d'atteindre les effets escomptés, dans l'esprit du dispositif CORSIA et des directives formulées par le CAEP.

Deuxièmement, dans un cadre réglementaire d'ores et déjà extrêmement contraignant, une accumulation excessive de nouvelles interdictions s'avérerait contre-productive. L'exemple du Renewable Fuel Standard (RFS), qui impose un usage annuel croissant de biocarburants sur le territoire américain, est à ce titre particulièrement éloquent. Celui-ci s'est avéré contre-productif, en favorisant l'usage à court terme de biocarburants de piètre qualité. Le Government Accountability Office (GAO) américain a ainsi conclu en 2016 que les mesures encourageant la R&D dans les Sustainable Aviation Fuels (SAF) demeuraient bien plus efficaces.

Sur ces bases, deux grandes familles de mesures légales incitatives et mondiales semblent primordiales pour accompagner le changement comportemental du secteur : les instruments de marché ("market-based measures") et la démocratisation de labels.

« Nous choisirons le meilleur scénario vers 2025 »

*Stéphane Cueille, Directeur Innovation Safran, 23/7/20*

### **Accompagner le chemin vers une aviation neutre : la compensation carbone**

L'achèvement d'un transport aérien durable sera un processus long, dont les innovations technologiques et opérationnelles seules ne pourront suffire avant plusieurs décennies. De manière provisoire, il est donc nécessaire de compenser les émissions de carbone excédentaires : c'est le rôle des instruments de marché.

L'industrie aéronautique a ainsi été précurseur en devenant le premier secteur à adopter un système global de compensation carbone, intitulé CORSIA. Couvrant 76% des RTKs (Revenu Tonne-Kilometre) de l'aviation internationale civile et militaire, ce mécanisme unifie un "patchwork" d'initiatives régionales indépendantes, pour compenser 2,5 milliards de tonnes de CO<sub>2</sub> d'ici 2035.

Afin d'atteindre les objectifs fixés par l'OACI, deux pistes d'approfondissement de ce système sont à envisager. La première est l'élargissement de la proportion de vols inclus dans le programme. Rassemblant aujourd'hui 88 états, CORSIA doit progressivement accueillir les pays restants, en prévoyant un système provisoire de compensation économique et sociale pour les économies les plus défavorisées. Représentant un tiers des émissions du secteur, les vols nationaux devront également, à terme, être intégrés au système.

La seconde repose sur une bonne implémentation opérationnelle du système. Il est tout d'abord indispensable d'éviter tout doublon avec un mécanisme régional, tel le Système d'Échange de Quotas d'Émission de l'UE (ETS), afin de ne compenser une émission qu'une seule fois. L'harmonisation de la méthode de reporting des émissions de CO<sub>2</sub> est également primordiale, pour éviter toute concurrence asymétrique. Alors qu'à titre d'exemple, la France et la Chine ont deux systèmes d'évaluation des émissions différentes, un mécanisme international et indépendant doit être adopté, à l'image du FRED+ de l'IATA.

### **La transition par le changement des comportements : la généralisation des labels**

L'émergence du mouvement de boycott du transport aérien suédois "Flygskam" a mis en exergue la sensibilité croissante du consommateur vis à vis de son empreinte carbone. Si elle représente une menace pour le secteur, cette tendance est aussi une formidable opportunité d'accélérer la mutation, à travers les modifications de comportement des passagers. Dans cette optique, les labels sont des outils particulièrement puissants, comme ont pu le démontrer les tests de sécurité "Euro NCAP" dans l'automobile.

La généralisation des labels au sein de l'industrie aérospatiale doit ainsi être encouragée auprès l'ensemble des acteurs. Ceux-ci doivent couvrir la totalité des critères ESG, au-delà de la simple question environnementale. Cinq conditions en garantissent l'efficacité : crédibilité, comparabilité, transparence, clarté et participation généralisée.

Trois labels distincts semblent ainsi opportuns de développer :

- Approfondir la famille de normes ISO 14000, en collaboration avec l'Organisation Internationale de Normalisation, à destination des constructeurs, équipementiers, motoristes et prestataires de services MRO ;
- Démocratiser auprès du grand public l'IATA Environmental Assessment (IEnvA), en affichant directement sur le billet du passager ce label dédié aux compagnies aériennes ;
- Mettre en avant et généraliser l'Airport Carbon Accreditation Program, rassemblant déjà plus de 200 aéroports à travers le monde.

## **3 – Coopération financière régionale**

Comme rappelé en introduction, les gains de productivité environnementaux de l'industrie aéronautique ont essentiellement été motivés par des considérations économiques. L'enjeu du financement constitue ainsi le troisième pilier de l'organisation du secteur autour de sa transition verte. Cette stratégie doit être conçue à travers un double-prisme : le financement de programmes de R&D et la montée en cadence de la chaîne de production dans un premier temps, de même que la rentabilité de la filière face à la remise en cause de son business model dans un second temps.

### **Financer un effort en R&D sans précédent**

Du fait de sa complexité technologique, le transport aérien reste par essence une industrie à haute intensité capitalistique. On estime que, suivant les programmes, développer un nouvel avion commercial coûte entre 10 et 25 milliards d'euros. Il est donc indispensable de repenser les structures et outils de financement encadrant la R&D des prochaines générations d'appareils.

Les enjeux de propriété intellectuelle et de souveraineté sont inhérents à l'industrie aérospatiale civile et de défense. Des mécanismes de financement nationaux voire régionaux, plutôt qu'internationaux, s'avèrent ainsi plus judicieux. Un co-investissement en CAPEX à travers des partenariats publics-privés doit ainsi être encouragé dans chaque aire économique, à l'image

du Clean Sky II européen. Des structures plus ciblées, telles Ace Management (consolidation des sous-traitants) et le CORAC (environnement) doivent également accompagner le développement de technologies stratégiques, préalablement identifiées au sein du CIAD. Les synergies entre recherche civile et militaire ont historiquement structuré l'industrie aéronautique. Ces derniers doivent également être associés à l'impératif de financement de la R&D, afin de maîtriser pleinement les innovations technologiques qui définiront l'espace aérien de demain.

Face à l'ampleur du défi technique, des outils financiers inédits doivent également être implémentés. Le risque associé à de tels programmes R&D induit un surcoût d'endettement majeur pour les sociétés : des instruments tels que les "green bonds" et "transition bonds", largement répandus dans le domaine de l'énergie, de même que le recours à des prêts garantis par l'état ou avantages fiscaux, représentent un panier de solutions efficaces à destination des principaux donneurs d'ordre. Les plus petites structures devront quant à elles bénéficier d'apports directs en fonds propres, provenant d'entités similaires à Clean Sky. Enfin, des mesures de marché plus globales, peuvent s'avérer particulièrement efficaces, à l'image des subventions gouvernementales pour le développement des SAF, en compensant l'écart de prix avec les carburants conventionnels à travers un système de "contract for difference" (CFD).

### Un modèle économique qui doit s'adapter à la mutation du secteur

Le secteur aéronautique est particulièrement hétérogène, à travers notamment son intensité concurrentielle (constructeurs vs compagnies aériennes) et la taille de ses acteurs (motoristes vs MRO). Par conséquent, répartir judicieusement

l'impact de la transition verte sur les business models et structures de coûts tout au long de la chaîne de valeur est primordial.

Une fois les deux prochaines générations d'avions commerciaux développées, les compagnies aériennes tiendront un rôle fondamental afin de rendre effectif l'effort technologique réalisé. Elles devront en effet renouveler massivement leurs flottes, représentant une charge financière massive, pour laquelle elles devront être aidées et incitées. La Commission Européenne estime ainsi qu'à l'horizon 2050, 75% de la flotte mondiale sera conforme aux exigences de Clean Sky II. La facture énergétique, qui à titre indicatif s'élevait en 2019 à 20% du chiffre d'affaires d'Air France-KLM, représente également un enjeu majeur. Celle-ci ne doit plus être un obstacle à l'adoption de motorisations alternatives, comme elle l'est aujourd'hui pour les biocarburants.

Enfin, l'amortissement des coûts de retraitement et de recyclage des aéronefs sur l'ensemble de la chaîne de valeur doit être repensé. Le dernier propriétaire de l'appareil ne peut pas à lui seul assumer l'ensemble des frais associés. Ceux-ci doivent être répartis selon le principe de pollueur-payeur tout au long du cycle de vie de l'avion. Une prime à la casse, financée par une éco-participation à l'achat d'un appareil, représente ainsi une piste prometteuse. Dans cet esprit, les constructeurs soutiennent progressivement la montée en cadence de la filière recyclage, à l'image d'Airbus et Safran à travers la société Tarmac Aerosave.

Au-delà de ces défis technologiques, stratégiques et organisationnels, un défi RH est également à relever en termes de compétences, créativité et mobilisation dans l'accompagnement de cette évolution majeure.

## Conclusion

**L**a prise en compte grandissante de l'enjeu environnemental au sein de la société vient marquer une profonde rupture avec les vecteurs d'innovation traditionnels de l'industrie aéronautique : la suprématie militaire jusqu'à la fin des années 90, auquel a succédé l'impératif économique associé à la croissance exponentielle du trafic aérien civil.

Par conséquent, ce Livre Blanc s'est attaché à présenter une refonte de l'organisation de la filière, avec pour piliers l'innovation technologique durable, la coopération internationale et une juste répartition de la propriété intellectuelle et des bénéfices à l'ensemble de la chaîne de valeur.

Ce cadre doit être pensé au-delà de la simple réduction des émissions sonores et chimiques. L'accès au transport aérien se démocratise à une classe moyenne grandissante, dont les bénéfices économiques et sociaux doivent être mieux partagés à l'échelle du Globe. La mobilisation de l'ensemble des acteurs du transport aérien durant l'épidémie de Covid-19 a ainsi mis en lumière le rôle sociétal fondamental de ce secteur.

# Remerciements

Prendre part à l'édition 2020 des Usaire Student Awards nous a permis d'approfondir un sujet qui nous tient particulièrement à cœur, celui de l'indispensable transition verte du transport aérien.

A ce titre, nous tenons en premier lieu à remercier le jury du concours et les associations Usaire et Oraje, à travers leurs présidents respectifs Michel Dubarry et Julie Guth. La qualité de l'organisation et leur accompagnement permanent nous ont permis

de rejoindre une formidable communauté de passionnés d'aéronautique. Nous remercions également Béatrice Clair, dont la disponibilité et les conseils ont été précieux dans la réalisation de notre dossier.

Enfin, nous tenons à remercier tous ceux qui, par leurs opinions, relectures et échanges ont contribué à enrichir ce Livre Blanc.



**Florian Gandon**

florian.gandon@sciencespo.fr  
+33(0)6.32.67.46.64

*Aerospace PE Analyst Intern - Ace Management  
Master Finance et Stratégie - Sciences Po Paris*

Pilote de planeur et passionné par l'aéronautique, je suis convaincu que la finance et les affaires publiques sont deux piliers de cette industrie à la fois stratégique et intensive en capitaux. Dans cette logique, j'ai rejoint le Master Finance et Stratégie de Sciences Po.

Suite à des expériences au sein d'Airbus, UnaBiz (Sigfox) et du groupe d'études aérospatial de l'Assemblée Nationale, je suis actuellement Analyste Private Equity stagiaire chez Ace Management, où nous gérons le fonds de relance d'un milliard d'euros de l'industrie aéronautique, notamment financé par Airbus, Safran, Dassault Aviation, Thales, Tikehau Capital et l'état français.



**Corentin Lefloch**

corentin.lefloch@student.isae-supaero.fr  
+33(0)6.87.78.11.12

*Data Science Last Year Student - ISAE-Supaero  
Master Finance et Stratégie - Sciences Po Paris*

Passionné depuis toujours par l'aéronautique, j'ai eu la chance de rejoindre l'ISAE-Supaero à la suite d'une classe préparatoire scientifique. J'ai ensuite effectué un double-diplôme avec Sciences Po Paris, en master Finance et Stratégie.

En effet, je suis convaincu de la nécessité d'allier ces connaissances à l'ingénierie pour développer une compréhension fine de l'industrie aéronautique, ceci afin de participer activement à ses évolutions futures. Je poursuis actuellement ma dernière année d'école d'ingénieur, spécialité sciences des données de la décision.

# Bibliographie

- Caillet, O., et al. (2020). The role of alternative fuels in the decarbonization of the aviation sector. Présentation au sein de l'ISAE-SUPAERO le 06/07/20
- Clean Sky, (2017), Clean Sky 2 Joint Undertaking Development Plan.
- Courteau, R. (2013). Les perspectives d'évolution de l'aviation civile à l'horizon 2040 : préserver l'avance de la France et de l'Europe. Assemblée Nationale
- Cylad Consulting. (2020). Piste d'évolutions technologiques de l'industrie aéronautique. Présentation donnée en février 2020 dans le cadre d'un enseignement de l'ISAE-Supaero
- Direction Générale de l'Aviation Civile. (2019). Rapport Environnement de l'Aviation Civile
- European Aviation Safety Agency. (2019). European Aviation Environmental Report 2019.
- European Commission. (2019). An Aviation Strategy for Europe.
- Graver, B., Zhang, K., & Rutherford, D. (2019). CO2 emissions from commercial aviation, 2018. The International Council of Clean Transportation
- IATA. (2020). Annual Review 2019.
- International Civil Aviation Organisation. (2019). Destination Green: The Next Chapter. 2019 Environmental Report
- International Civil Aviation Organisation. (2017). Financing Aviation Emissions Reductions. Transforming Global Aviation Collection
- International Civil Aviation Organisation. (2017). Renewable Energy for Aviation. Transforming Global Aviation Collection
- ONERA. (2019). La feuille de route scientifique et technologique de l'ONERA
- Senate Commerce, Science, and Transportation Committee. (2016). Our Plan for the Future of Aviation. US Senate