



équilibre des énergies

EdEn+

CONSTRUISONS UNE SOCIÉTÉ ÉNERGÉTIQUE MEILLEURE

Destination aviation durable



PUBLICATION HORS-SÉRIE
DE L'EDENMAG
ÉTÉ 2022

Équilibre des Énergies remercie tous les auteurs qui ont apporté leur concours à la réalisation de ce numéro hors-série EdEn+ de l'*EdEnMag*.

EdEnMag tient tout particulièrement à remercier **Mme Adina Vălean**, commissaire européenne aux transports, ainsi que **M. Brice Lalonde**, ancien ministre, président d'Équilibre des Énergies, pour leur concours.

La réalisation du présent document a été coordonnée par **Jean-Pierre Hauet**, *Chief Scientist*, Équilibre des Énergies, **Cecil Coulet** et **Olivier Lagrange**, *Policy Officers*.

REMERCIEMENTS

Membres d'Équilibre des Énergies

Air France KLM

Anne-Marie Couderc, présidente

François Delabre, directeur délégué Affaires institutionnelles

Airbus

Guillaume Faury, président

Glenn Llewellyn, *Vice President*, en charge des avions zéro émission

Aéroport de Paris

Amélie Lummaux, directrice du Développement durable et des Affaires publiques

Sébastien Couturier, directeur de l'Aéroport Paris – Le Bourget et des aérodromes d'aviation générale

Safran

Thibaud Normand, directeur Climat

TotalEnergies

Jean-Marc Durand, directeur Raffinage BaseChem Europe et directeur par intérim Renewable Fuels

Autres personnalités et experts

Parlement européen

Marian-Jean Marinescu, député européen, coordinateur du groupe PPE au sein de la Commission des transports (TRAN)

Assemblée nationale

Jean-Luc Lagleize, député

ISAE-SUPAERO

Scott Delbecq, **Nicolas Gourdain**, **Jérôme Fontane**, **Florian Simatos**, **Hugo Mugnier**, **Thomas Planès**

Aviation sans frontières

Gérard Feldzer, président, ancien commandant de bord, instructeur à Air France

Association internationale du transport aérien (IATA)

Rafael Schwartzman, *Vice President* région Europe

EUROCONTROL

Philippe Merlo, directeur Aviation civile-militaire européenne

AURA AERO

Jérémy Caussade, président



Adina Vălean,
commissaire
européenne aux
transports

Comment intégrer le transport aérien dans une société décarbonée ?

L

e transport aérien joue un rôle essentiel dans notre économie et dans notre vie quotidienne, notamment pour les millions d'entre nous qui vivent dans des îles ou des régions périphériques. Il permet de rapprocher les citoyens de leurs familles et de leurs amis, crée des emplois ou des opportunités commerciales et fournit des liens essentiels à la cohésion des villes et des régions difficiles d'accès.

Des solutions de mobilité propre sont en train d'émerger dans d'autres modes de transport comme le secteur routier – les voitures électriques font de plus en plus partie de notre quotidien –, mais le transport aérien bas carbone n'en est pas encore là. Le secteur est particulièrement difficile à décarboner en raison de sa forte dépendance à l'énergie fossile liquide qui est pour l'instant la seule à pouvoir fournir la puissance énergétique requise pour faire voler des avions commerciaux. L'aviation représente encore environ 3 % de l'empreinte carbone de notre économie.

Le transport aérien bas carbone n'en est pas encore là. Le secteur est particulièrement difficile à décarboner en raison de sa forte dépendance à l'énergie fossile liquide qui est pour l'instant la seule à pouvoir fournir la puissance énergétique requise pour faire voler des avions commerciaux

Face à la pandémie de la Covid-19, notre société a pris toute la mesure de l'importance de l'aviation pour la circulation des personnes et des biens. Dans le même temps, cette période a coïncidé avec un travail intense au niveau politique et industriel pour faire redémarrer le transport aérien de manière plus durable. Je suis optimiste quand je vois les derniers engagements des industries aéronautiques européennes et mondiales pour réduire de manière significative l'empreinte carbone du transport aérien. Nous nous rapprochons du moment où nous pourrions offrir à nos concitoyens une mobilité aérienne plus propre. Nous savons que des solutions concrètes seront bientôt disponibles : des vols plus directs, des carburants d'aviation durables plutôt que fossiles, des avions plus économes en carburant ou des avions à zéro émission. Je suis convaincue que l'avenir de la mobilité aérienne est durable. La clé est de combiner l'action de l'industrie avec des politiques audacieuses et efficaces. Laissez-moi vous expliquer comment je vois ces politiques.

avions à zéro émission. Je suis convaincue que l'avenir de la mobilité aérienne est durable. La clé est de combiner l'action de l'industrie avec des politiques audacieuses et efficaces. Laissez-moi vous expliquer comment je vois ces politiques.

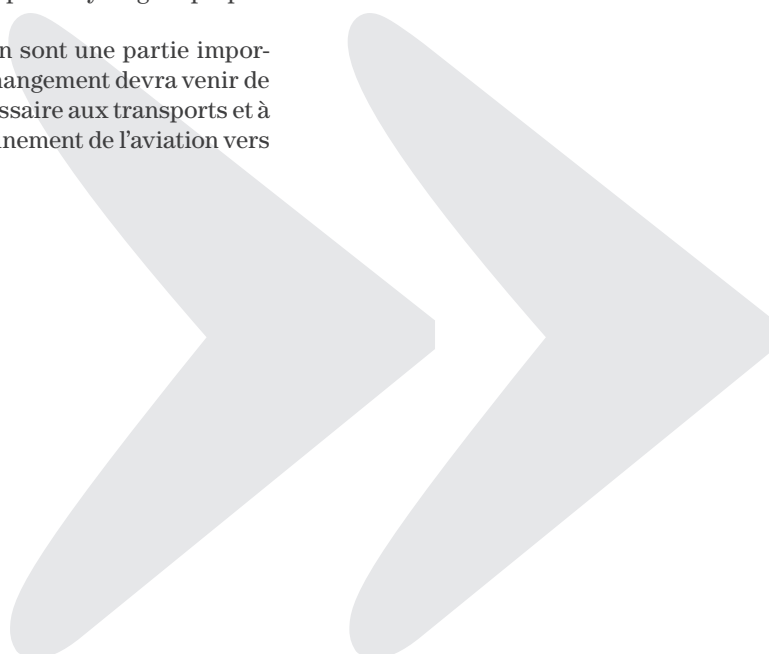
En 2020, la Commission a adopté sa stratégie de mobilité intelligente et durable. Cette feuille de route ambitieuse a fixé la ligne de conduite des actions politiques pour mettre en œuvre le Pacte vert européen et se conformer aux objectifs climatiques de l'UE de réduire les émissions de 55 % d'ici 2030 et de devenir neutre en carbone d'ici 2050. Pour décarboner l'aviation, la stratégie a annoncé une action renforcée, notamment sur la gestion du trafic aérien, les mesures de tarification du carbone, les mécanismes basés sur le marché mondial, le financement de la recherche et du déploiement de projets verts et la promotion ...

des carburants d'aviation durables. En juillet 2021, la Commission a adopté un ensemble de propositions réglementaires pour intégrer dans le droit européen les mesures qui permettront d'atteindre les objectifs climatiques de l'UE. Plusieurs de ces mesures contribuent à accélérer la décarbonation de l'aviation. La révision du système d'échange de quotas d'émission de l'UE obligera d'ici 2027 les compagnies aériennes à acheter des quotas (ou crédits carbone) couvrant l'ensemble de leurs émissions de carbone. L'augmentation du prix des crédits carbone incitera les compagnies aériennes à accélérer la réduction de leurs émissions. Nous proposons d'intégrer dans le droit de l'UE le système mondial de compensation et de réduction du carbone (CORSIA), pour compenser les émissions internationales dépassant les niveaux de 2019. La Commission a adopté un nouveau règlement visant à garantir que les compagnies aériennes utiliseront à partir de 2025 une fraction croissante de carburants d'aviation durables, notamment les biocarburants avancés et les carburants synthétiques. Le régime fiscal des carburants d'aviation sera également révisé pour encourager les compagnies aériennes à utiliser des carburants d'aviation plus durables, au lieu des combustibles fossiles. Les infrastructures des aéroports devront assurer l'approvisionnement en électricité des avions stationnés aux portes et aux postes extérieurs, afin d'éviter l'utilisation de moteurs fonctionnant à l'énergie fossile. Enfin, l'UE doit continuer à agir comme un seul bloc pour promouvoir des politiques de durabilité ambitieuses au niveau de l'OACI, en particulier pour convenir d'un objectif à long terme de réduction des émissions.

Parallèlement à ces propositions législatives, la Commission propose de nombreuses autres incitations pour assurer la transition vers une aviation verte. Pour n'en citer que quelques-unes, Horizon Europe et les deux initiatives sur l'aviation propre et SESAR (gestion du trafic aérien) mobiliseront des fonds importants dans la recherche et le développement. La Commission met en place plusieurs alliances industrielles pour réduire les risques liés aux investissements et créer la collaboration nécessaire entre les investisseurs, les entreprises et les pouvoirs publics, par exemple l'Alliance pour les carburants renouvelables et à faible émission de carbone, l'Alliance pour l'aviation zéro émission ou l'Alliance pour l'hydrogène propre.

Ces mesures politiques proposées par la Commission sont une partie importante de l'équation, mais en fin de compte, le véritable changement devra venir de l'industrie. C'est un défi passionnant ! En tant que commissaire aux transports et à la mobilité, je suivrai de très près chaque étape du cheminement de l'aviation vers un avenir à faible émission de carbone. ●

L'UE doit continuer à agir comme un seul bloc pour promouvoir des politiques de durabilité ambitieuses au niveau de l'OACI, en particulier pour convenir d'un objectif à long terme de réduction des émissions





N'interdisons pas à nos enfants de rêver



Brice Lalonde,
ancien ministre,
président d'Équilibre des Énergies

« **N**otre amour à nous, c'est l'aviation. Nous quitterons tout. L'avion remplacera pour nous tout autre amour. Malheur à celui qui n'a pas compris cela ». Ainsi écrivait Jules Roy, l'un de nos écrivains aviateurs, comme l'étaient Joseph Kessel, André Malraux, Romain Gary, Antoine de Saint-Exupéry, trésors de la littérature française.

Et à quoi ressemblerait notre Union européenne si Paris n'était plus à deux heures de Copenhague, Vienne à deux heures d'Athènes ou Berlin à trois heures de Madrid ?

Quel enfant n'a pas rêvé à la rencontre de l'aviateur et du Petit Prince ? Mais l'aviation est montrée du doigt, Greta Thunberg ne monte plus à bord pour éviter de brûler du kérosène, « l'aérien ne doit

plus faire partie des rêves d'enfants » proclame en mars dernier Léonore Moncond'huy, maire verte de Poitiers, en supprimant la subvention à l'aéro-club de sa ville. Qu'elle retire une subvention, on peut comprendre, mais qu'elle interdise le rêve, au pays des frères Montgolfier et de Clément Ader, c'est tout de même excessif. L'humanité a toujours rêvé de voler.

Et c'est bien par le rêve et l'acharnement d'ingénieurs et de pionniers que le transport aérien est devenu une réalité, transformant la géographie, effaçant océans et montagnes, rapprochant les peuples, améliorant chaque nouvelle génération d'avions, faisant du tourisme la première industrie mondiale. Et comment ferait-on pour traverser les continents sans avoir besoin de percer des routes, aux États-Unis, au Canada, en Russie, au Brésil, en Chine ? Pour relier les îles en Indonésie et dans le Pacifique ? Et à quoi ressemblerait notre Union européenne si Paris n'était plus à deux heures de Copenhague, Vienne à deux heures d'Athènes ou Berlin à trois heures de Madrid ? Combien, parmi les milliers d'étudiants profitant du programme Erasmus chaque année, feraient encore le choix d'étudier dans un autre pays européen ?

Le transport aérien est devenu un acteur majeur de l'économie, stimulant les activités des lieux qu'il dessert, leur donnant un avantage sur les territoires qui se plaignent d'être « enclavés » et délaissés. En 2018, la filière aérienne soutenait deux millions d'emplois directs dans l'Union européenne et près de 10 millions d'emplois indirects, incluant les métiers liés à la chaîne d'approvisionnement et au tourisme. Le secteur de l'aviation est l'un des derniers où l'Union européenne, et la France en particulier, peuvent se targuer d'un vrai leadership sur la scène internationale. Alors que nous avons largement laissé l'Asie et les États-Unis prendre la main sur la production automobile, le numérique et les techniques de la transition énergétique comme les panneaux solaires, l'aérien reste une filière d'excellence pour l'Europe. Airbus est aujourd'hui le premier constructeur aéronautique mondial, tandis que le Groupe ADP se place en haut du classement des groupes aéroportuaires.

Quant aux compagnies aériennes, Air France-KLM est la première compagnie sur l'activité de cargo. L'équipementier Safran – encore une entreprise française – est le premier fournisseur mondial dans le secteur aéronautique. Au total, l'aviation a apporté en 2018 une contribution de l'ordre de 675 milliards d'euros au PIB européen. L'Union européenne et la France ont laissé partir vers d'autres pays trop d'activités qui forment à présent chez eux un vivier d'emplois et de dynamisme économique. Ne reproduisons pas la même erreur avec le secteur aérien.

La réduction des émissions de gaz à effet de serre est déjà à l'œuvre dans les entreprises de l'aérien. Grâce aux efforts combinés de TotalEnergies, d'Airbus et d'Air France-KLM notamment, des carburants nouveaux alimentent tout ou partie des vols depuis un an. Dérivés d'abord de la biomasse, ils devront être produits ensuite en combinant l'hydrogène au CO₂ capté à partir d'usines émettrices, voire de l'atmosphère. Ce sont les SAF (*Sustainable Aviation Fuels*). Ils seront neutres en carbone, mais plus coûteux à produire. Plus tard, une nouvelle génération d'avions verra le jour. L'avion électrique vole déjà, mais sur de courtes distances et avec peu de passagers. L'avion propulsé à l'hydrogène est à l'horizon. Les moteurs eux aussi se font de plus en plus efficaces et de moins

Le transport aérien est devenu un acteur majeur de l'économie, stimulant les activités des lieux qu'il dessert, leur donnant un avantage sur les territoires qui se plaignent d'être « enclavés » et délaissés

en moins gourmands en énergie. Le moteur LEAP de Safran permet déjà une économie de 15 % de carburant par rapport au modèle précédent et des travaux sont en cours pour développer un modèle qui permettra d'économiser 20 % de carburant supplémentaires.

Les aéroports travaillent de leur côté à réduire leur empreinte carbone. Ils transforment leurs bâtiments, diminuent le temps de roulage des avions, les alimentent en électricité une fois au sol, se préparent à l'avènement de l'hydrogène. Le transit des passagers et des employés représente une part non négligeable

des émissions du secteur aérien, la filière travaille à des solutions pour les diminuer. Le Groupe ADP participe à un projet de déploiement de taxis volants électriques qui sera expérimenté lors des prochains Jeux olympiques. Combien d'années a-t-il fallu attendre pour que le secteur automobile, qui est un contributeur autrement plus significatif à nos émissions que le secteur aérien, fasse preuve d'un tel engagement et d'une telle proactivité pour la réduction de ses émissions de gaz à effet de serre ?

Sans doute le secteur aérien n'est-il pas appelé à poursuivre le développement rapide qu'il connaissait avant la crise de la Covid. Les carburants durables seront plus chers et en quantité plus limitée que le kérosène fossile. Le tourisme de masse, auquel l'aérien doit en partie sa croissance, devra s'adapter aux sociétés décarbonées. Et, sans doute, les aéroports n'ont-ils pas besoin de se transformer en temples de la consommation débridée, comme l'a noté le philosophe Gaspard Koenig. Cependant, le tourisme contribue au développement, l'aviation resserre la communauté de destin de l'humanité. Au lieu d'en faire les boucs émissaires de la protection du climat, faisons émerger une filière aérienne dynamique et soutenable qui continue à satisfaire le besoin universel des humains de voyager et de se connecter à leurs semblables.

Nos décideurs français et européens ont aujourd'hui à travailler sur des projets de lois clés pour l'avenir du secteur aérien. J'espère qu'ils mettront dans leurs décisions autant d'espoir et de détermination à faire émerger l'aviation durable que ce que les pionniers du XX^e siècle ont mis à faire décoller le premier avion. ●

Sommaire

SYNTHÈSE

- 9 Jean-Pierre Hauet, Chief Scientist
La décarbonation du secteur aérien à horizon 2050 est possible

GRAND ENTRETIEN AVEC

- 14 Anne-Marie Couderc, présidente non exécutive d'Air France-KLM
Air France-KLM atteindra le « zéro émission nette » en 2050
- 18 Guillaume Faury, président d'Airbus
La transition écologique est au cœur de la stratégie d'Airbus

POINT DE VUE

- 22 Marian-Jean Marinescu, eurodéputé, coordinateur du groupe PPE au sein de la commission des transports (TRAN) du Parlement européen
Réinventer l'aviation
- 24 Jean-Luc Lagleize, député, co-président du groupe d'études Secteur aéronautique et spatial de l'Assemblée nationale
Le secteur aéronautique est l'un des fleurons industriels français et doit le rester
- 26 Gérard Feldzer, président d'Aviation sans frontières
Aviation et transition : c'est maintenant qu'il faut agir
- 28 Rafael Schwartzman, Vice President région Europe IATA
Vol 2050 à destination de l'émission nette zéro

LE RÉFÉRENTIEL ISAE-SUPAERO

- 30 Nicolas Gourdain, enseignant-chercheur, ISAE-SUPAERO
Changement climatique : quels impacts sur le transport aérien ?
- 32 Jérôme Fontane et Florian Simatos, ISAE-SUPAERO
Les effets non-CO₂ : l'autre impact climatique de l'aviation
- 34 Scott Delbecq, Jérôme Fontane, Nicolas Gourdain, Hugo Mugnier, Thomas Planès, Florian Simatos, ISAE-SUPAERO
Pourra-t-on concilier décarbonation et croissance du trafic aérien ?

CONTEXTE LÉGISLATIF

- 38 Cecil Coulet, Équilibre des Énergies
Le règlement ReFuelEU : comment déployer les carburants durables dans le secteur aérien ?
- 39 Olivier Lagrange, Équilibre des Énergies
Climat-résilience : la contribution de l'aérien à la décarbonation
- 40 François Delabre, directeur délégué Affaires Institutionnelles - Air France KLM
Les enjeux des systèmes EU-ETS et CORSIA
- 42 Philippe Merlo, directeur Aviation civile-militaire européenne, EUROCONTROL
Le ciel unique européen : un potentiel de réduction des émissions de 10 %

INNOVATIONS

- 44 Glenn Llewellyn, Vice President, Airbus, en charge des avions zéro émission
Hydrogène : le courage d'oser
- 46 Jérémmy Caussade, président d'AURA AERO
L'avion tout électrique : c'est possible
- 48 Sébastien Couturier, directeur de l'Aéroport Paris-Le Bourget et des Aéroports d'Aviation Générale
Les drones taxis ne sont plus de la science-fiction
- 50 Jean-Marc Durand, directeur Raffinage BaseChem Europe et directeur par interim Renewable Fuels, TotalEnergies
Les carburants aériens durables : une solution incontournable pour réduire les émissions du secteur

FOCUS

- 54 Amélie Lummaux, directrice du Développement durable et des Affaires publiques de Groupe ADP
Les aéroports : catalyseurs du transport aérien bas carbone
- 58 Joffrey Maï, directeur Environnement et Développement durable VINCI Concessions
Un plan d'action d'ampleur internationale pour la décarbonation des aéroports
- 62 Thibaud Normand, directeur Climat, Safran
Les leviers technologiques de décarbonation de l'aviation
- 68 **QUELQUES CHIFFRES CLÉS SUR L'AVIATION**

La décarbonation du secteur aérien à horizon 2050 est possible

Jean-Pierre Hauet,
Chief Scientist, Équilibre des Énergies

La décarbonation de l'aviation est un prérequis incontournable pour permettre au secteur aérien, encore convalescent de l'épisode de la Covid, de retrouver de façon durable la voie de la croissance et de continuer ainsi à répondre aux besoins de l'économie et aux aspirations des peuples à se déplacer.

Certains ont trop vite conclu que cette décarbonation était impossible et ont voué le secteur aérien à une disparition lente, en tentant de jeter le discrédit sur ceux qui s'accrocheraient à un mode de transport jugé par eux dépassé. Équilibre des Énergies a procédé avec ses membres à une évaluation détaillée de la problématique de la décarbonation du secteur aérien, elle a interviewé de hauts responsables et recueilli de nombreuses contributions qui sont rassemblées dans le présent numéro hors-série de l'*EdEnmag*. Les conclusions sont claires : la décarbonation du secteur aérien est possible mais elle est difficile. Pour l'atteindre à horizon 2050, des mesures d'incitation et de soutien doivent être prises, au niveau français mais encore plus au niveau européen et au niveau international, pour permettre aux acteurs économiques de progresser sur l'échéancier menant à cet objectif.

LES FONDEMENTS DE LA DÉCARBONATION DU SECTEUR AÉRIEN

Plusieurs études de renom ont été menées au cours des toutes dernières années sur les feuilles de route envisageables pour parvenir à la décarbonation du



secteur aérien¹. Équilibre des Énergies, en sollicitant l'expertise et les analyses de ses membres et en y adjoignant le point de vue de spécialistes externes, les a passées en revue. Ces études font consensus : elles montrent qu'il n'existe pas de *silver bullet* pour atteindre la décarbonation mais que celle-ci peut se construire en agrégeant différentes approches qui relèvent de la gestion des opérations, du progrès technique et de la migration vers des carburants durables.

L'optimisation des opérations (Air Traffic Management)

Les mesures visant à améliorer l'efficacité des opérations, qu'il s'agisse de la gestion du trafic aérien ou des aéroports, sont celles qui sont susceptibles de produire les effets les plus rapides. L'initiative Ciel unique européen, engagée en 2004 par le premier paquet SES I, a produit des résultats substantiels et a été renforcée par le paquet SES II de 2009. Mais on estime ainsi qu'il reste un potentiel d'amélioration de l'ordre de 10 % qui peut être valorisé en optimisant les trajectoires aériennes en Europe.

...

1. Notamment : « Destination 2050, a route to net zero european aviation » (Februray 2021) – Waypoint 2050 (September 2021).

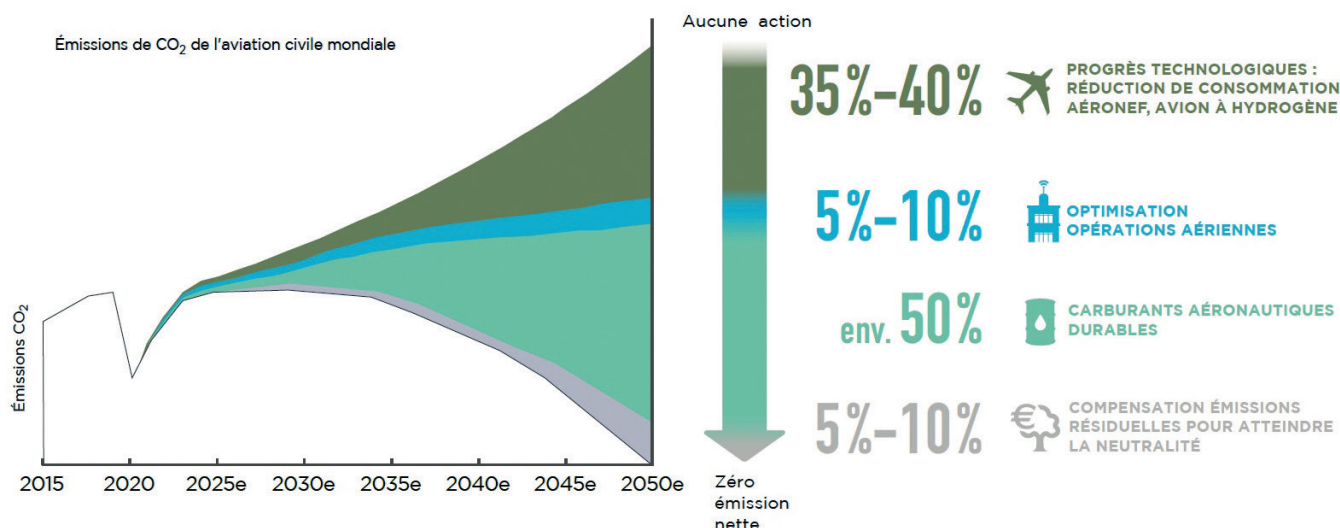


Fig. 1 : Les principaux leviers de décarbonation du secteur aérien. © Safran.

Les progrès techniques

Les progrès techniques se matérialiseront, au cours des toutes prochaines années, par le remplacement de la flotte des aéronefs aujourd'hui en service par les avions disponibles sur le marché qui permettent de réduire les consommations de 15 % environ par rapport à la génération antérieure. À moyen terme, de nouveaux progrès techniques, dans le sillage des progrès réalisés au cours des années passées, apporteront de nouvelles contributions à la décarbonation grâce aux progrès sur l'aérodynamique, l'allègement des aéronefs et l'efficacité des moteurs. Les constructeurs prévoient que les avions mis en service vers 2035 permettront une économie de 20 % par rapport à la génération actuelle.

Au-delà de 2035, l'arrivée des avions à hydrogène, sur les court et moyen-courrier, peut constituer une rupture technologique. Trois concepts sont en cours d'étude par Airbus avec des capacités de transport allant jusqu'à 200 passagers sur 3 700 km.

Entre-temps, l'hybridation électrique se sera développée, pouvant aller jusqu'à l'avion 100 % électrique pour les avions d'entraînement et les taxis volants et même jusqu'à des aéronefs transportant une petite vingtaine de passagers sur quelque 400 km.

Au total, on peut penser que le progrès technique contribuera à hauteur de 35 à 40 % à la réduction des émissions en 2050.

L'enjeu des carburants durables pour l'aviation

Le défi le plus important pour la décarbonation de l'aviation réside dans le développement de carburants durables pour l'aviation ou SAF (*Sustainable Aviation Fuels*). Ces carburants sont dès aujourd'hui une réalité : il existe sept versions de carburants de première génération qui ont été homologués par

l'ASTM² pour être mélangés en proportions variables avec le kérosène conventionnel. Ces carburants sont fabriqués essentiellement selon le processus HEFA (*Hydroprocessed Esters and Fatty Acids*) qui permet de traiter les huiles de cuisson usagées et les graisses animales et qui est la seule la technologie arrivée au stade commercial à ce jour.

Les SAF permettent, en cycle de vie, une réduction des émissions de CO₂ allant jusqu'à 90 % par rapport à leur équivalent fossile. Des vols de démonstration 100 % SAF ont été effectués avec succès démontrant la validité de cette approche.

Cependant, les SAF actuels ne couvrent que 0,01 % des besoins, les quantités disponibles sont limitées et les prix sont élevés (de l'ordre de quatre fois les prix actuels du kérosène).

Le développement des SAF à grande échelle pose plusieurs défis :

- un défi technique visant à élargir au-delà de la filière actuelle des HEFA les processus de fabrication afin d'étendre les types de ressources (*feedstocks*) pouvant servir de base à leur fabrication. En particulier la filière FT (Fischer Tropsch) devrait permettre de valoriser des matières premières, de type résidus agricoles ou forestiers ou déchets municipaux, mais elle ne peut pas être considérée comme mature et nécessitera des investissements très lourds ;
- un problème de disponibilité en ressources d'origine biologique, compte tenu de la nécessité de ne pas porter atteinte à la biodiversité et aux cultures agricoles vivrières. Cette limitation incite à envisager la fabrication de carburants synthétiques d'origine non biologique, ou e-fuels, à partir d'hydrogène bas carbone, d'électricité également décarbonée et de CO₂ récupéré, y compris par récupération directe dans l'air ;

2. L'ASTM (American Society for Testing of Materials) est l'organisme qui rédige et produit des normes techniques internationales, notamment pour les carburants aviation.

- un défi économique car les filières avancées de production des SAF font à ce stade apparaître des prix de revient encore plus élevés que ceux de la filière HEFA ;
- un problème de concurrence dans la mesure où il serait inconcevable que certaines compagnies aériennes soient tenues d'utiliser les SAF alors que d'autres, au niveau international, ne seraient assujetties à aucune obligation.

La Commission européenne a mis en discussion un projet de règlement dénommé ReFuelEU conduisant à une obligation d'incorporation de SAF s'élevant progressivement de 2 % en 2025 jusqu'à 63 % en 2050 dont 28 % d'e-fuels. La réglementation française impose dès 2022 un mandat d'incorporation de SAF à hauteur de 1 % et vise un objectif de 2 % à horizon 2025 et de 5 % à horizon 2030.

La combinaison de ces trois approches – optimisation des opérations, progrès techniques et carburants durables – est de nature à permettre de réduire à pratiquement zéro les émissions du secteur aérien à horizon 2050, selon un scénario qui pourrait être celui de la figure 1. Le solde des émissions en 2050 pourra faire l'objet de compensation.

LES ÉMISSIONS NON CO₂

L'attention se porte généralement en priorité sur les émissions de CO₂ du secteur aérien résultant de la combustion du kérosène. Cependant, les effets non CO₂ ne sont pas marginaux. Ils résultent des cirrus induits par les traînées de condensation, des émissions d'oxyde d'azote, de vapeurs d'eau et d'aérosols, sans négliger la modification des propriétés des nuages. Certains de ces effets sont refroidissants, d'autres réchauffants et, même si les estimations d'experts varient, ces derniers l'emportent largement au point que l'on considère que les effets non CO₂ pourraient contribuer aujourd'hui à hauteur de deux tiers au réchauffement climatique induit par le secteur aérien.

Les effets non CO₂ sont significatifs mais, contrairement au CO₂, ils agissent pendant une durée limitée et donc ne se pérennisent pas dans l'atmosphère.

Lutter contre les effets non CO₂, c'est la possibilité d'obtenir un résultat rapide et significatif et de se donner ainsi davantage de temps pour la réduction des émissions de CO₂ qui sont indispensables mais difficiles à réaliser.

Il est admis que les SAF, qui contiennent moins de composés aromatiques et donc génèrent moins de suies et de traînées de condensation, ont un impact positif sur les effets non CO₂ de l'aviation.

L'EMPREINTE ENVIRONNEMENTALE DES AÉROPORTS

Les émissions des aéroports sont complexes à évaluer. Elles incluent bien entendu les émissions directes et les émissions liées aux achats d'énergie, ce qu'on appelle les scopes 1 et 2 tels que définis par le *GHG Protocol*. Mais ces émissions représentent une proportion minime (3 % environ) de celles relevant du scope 3 qui correspondent aux émissions des parties prenantes auxquelles les aéroports se trouvent associés : émissions des avions au stationnement et des engins d'assistance en escale, accès aux plates-formes aéroportuaires par les passagers et les salariés, décarbonation des opérations avion au sol.

L'*Airport Carbon Accreditation program* définit des étapes qui sont balisées par des niveaux d'accréditation allant aujourd'hui jusqu'au niveau 4+.

Chaque aéroport a désormais sa feuille de route. Les aéroports parisiens sont d'ores et déjà accrédités niveau 3 et celui de Lyon - Saint-Exupéry 3+.

INCITATIONS ET SOUTIENS À LA DÉCARBONATION : PRINCIPES GÉNÉRAUX

La décarbonation du secteur aérien est possible mais elle ne se fera pas toute seule. Elle nécessite la mise en place d'un ensemble cohérent de mesures, associant incitations et soutiens, aux niveaux national, européen et international. Ces politiques doivent trouver leur expression, pour la France dans la prochaine loi quinquennale de programmation énergie-climat, pour l'Europe dans le paquet *Fit for 55* et dans ses prolongements. Elles doivent impérativement tenir compte de deux impératifs essentiels :

• Préserver la compétitivité des secteurs aériens français et européen

Le secteur de l'aviation est l'un des derniers où l'Union européenne, et la France en particulier, disposent d'un leadership sur la scène internationale. En 2018, la filière aérienne soutenait deux millions d'emplois directs dans l'Union européenne et près de dix millions d'emplois indirects, incluant les métiers liés à la chaîne d'approvisionnement et au tourisme. La même année, l'aviation a apporté une contribution de l'ordre de 675 milliards d'euros au PIB européen.

Il est essentiel que les mesures qui seront prises pour décarboner le secteur aérien européen soient compatibles avec la préservation de la compétitivité de ce secteur. Un effondrement de sa compétitivité n'aurait en effet de sens ni sur le plan économique, ni sur le plan écologique : les sociétés européennes seraient simplement remplacées sur les marchés qu'elles occupent par des sociétés étrangères n'ayant pas à appliquer les normes environnementales européennes. ●●●

• Adapter la temporalité de la décarbonation aux défis propres au secteur aérien

La décarbonation du secteur aérien est possible mais elle représente un défi technique et économique plus difficile à relever que celui qui se pose à la plupart des autres secteurs.

Avant de parvenir à un secteur aérien décarboné, il faut admettre de l'inscrire dans une temporalité de décarbonation plus progressive que celle des secteurs pour lesquels des solutions de transition existent et sont déjà largement déployées, comme les secteurs de la mobilité routière et des bâtiments.

La transition énergétique du secteur aérien prendra davantage de temps, il est donc essentiel de mettre en place les mécanismes de soutien qui permettront dans les prochaines années de déployer à grande échelle les carburants durables et les nouveaux modèles d'avions.

LES PRINCIPALES MESURES À PROMOUVOIR

1. Accroître l'efficacité de la gestion du trafic aérien et des services de navigation aérienne

En 2019, l'Union européenne a lancé une nouvelle étape du Ciel unique européen (paquet *Single European Sky 2+*). Cette initiative est actuellement en débat entre les différentes institutions européennes. Certains obstacles politiques subsistent mais d'autres ont pu être levés, à la faveur notamment du Brexit. Il est à présent important de faire progresser les discussions dans le cadre du trilogue afin de parvenir dès que possible à un accord.

2. Encourager le renouvellement des flottes

Afin d'encourager les compagnies aériennes à renouveler leurs flottes, Équilibre des Énergies recommande d'intégrer le renouvellement parmi les activités durables définies par le règlement de la taxonomie verte et de conditionner le versement des aides publiques aux compagnies aériennes à des engagements sur le renouvellement de leurs appareils.

3. Flécher une partie des taxes appliquées au secteur aérien vers les efforts de décarbonation de la filière

Les taxes aériennes représentent aujourd'hui plus de 40 % du prix des billets mais les sommes collectées ne sont pas fléchées vers la décarbonation du secteur. La question du fléchage n'est pas non plus abordée dans le cadre des projets européens visant à taxer le kérosène et à mettre fin aux quotas ETS gratuits dont bénéficiait le secteur. Équilibre des Énergies recommande d'inclure dans les projets européens en discussion des dispositions assurant le fléchage d'une partie des taxes appliquées au secteur aérien, y compris les

revenus qui résulteront de la mise aux enchères des quotas aujourd'hui gratuits de l'EU-ETS, vers les efforts de décarbonation de la filière et en particulier le développement de nouvelles techniques.

4. Mettre en place des quotas d'incorporation de carburants durables mais en préservant la compétitivité des compagnies aériennes européennes

Équilibre des Énergies estime qu'un quota d'incorporation contraignant est nécessaire pour inciter les compagnies aériennes à migrer aussi rapidement que possible vers les carburants durables pour l'aviation (SAF). Elle soutient à ce titre le principe du mécanisme proposé par la Commission européenne au travers du règlement ReFuelEU. Cependant, ce mécanisme doit être rendu compatible avec la préservation de la compétitivité du secteur aérien européen. À cette fin :

- les pouvoirs publics français et européens doivent continuer à soutenir auprès de l'OACI les revendications visant à harmoniser la définition des SAF et à aligner les exigences résultant du système international du CORSIA avec celles imposées dans l'espace européen ;
- la réglementation européenne devrait assortir les obligations d'incorporation de SAF d'un système de certificats (*book & claim*) de façon à traiter sur un pied d'égalité les compagnies européennes et les compagnies internationales qui pourront se ravitailler dans des hubs situés en dehors de l'espace européen.



5. Élargir la liste des matières premières autorisées pour la production des SAF

Équilibre des Énergies soutient le principe d'élargir progressivement l'obligation d'incorporation de SAF. Cependant, le volume de production des SAF doit évoluer en conséquence et celui-ci est conditionné par l'accès aux matières premières nécessaires.

Équilibre des Énergies recommande d'élargir dans les textes européens (règlement ReFuelEU et directive RED) la liste des matières premières autorisées pour la production des SAF, notamment aux graisses animales de catégorie 3 dont l'utilisation est actuellement réservée à la production de cosmétiques et de carburants terrestres.

6. Élargir la définition des e-fuels

Les carburants synthétiques pour l'aviation (e-fuels) ne seraient, selon la proposition de la Commission dans le projet de règlement ReFuelEU, reconnus comme SAF que si leur contenu énergétique provient de sources renouvelables autres que la biomasse. Ceci impose l'utilisation d'électricité d'origine renouvelable. Équilibre des Énergies estime que l'électricité bas carbone doit pouvoir être prise en compte dans la définition des e-fuels afin qu'elle puisse contribuer à la décarbonation du secteur aérien, en augmentant les ressources en SAF disponibles.

7. Prioriser le secteur aérien dans l'utilisation des biocarburants

Le secteur aérien est plus difficile à décarboner que d'autres secteurs où d'autres technologies de transition sont disponibles (mobilités électrique ou hydrogène). Sa décarbonation sera largement dépendante de l'utilisation des SAF qui doivent pouvoir être rendus disponibles en quantités suffisantes.

Équilibre des Énergies recommande en conséquence de flécher, dans les politiques publiques, l'utilisation prioritaire des SAF au profit du secteur aérien. Au niveau européen, elle recommande d'adapter les coefficients multiplicateurs et seuils de consommation maximale présents dans la directive RED afin de marquer cette priorité.

8. Promouvoir les partenariats publics-privés pour soutenir le travail d'adaptation des aéroports

Les aéroports jouent un rôle clé dans le déploiement de l'aviation durable en mettant notamment en place les infrastructures nécessaires au développement des carburants alternatifs. Les aéroports français sont en avance par rapport aux réglementations en vigueur et anticipent par leurs propres moyens les besoins futurs des compagnies aériennes.

Équilibre des Énergies recommande d'accompagner les aéroports dans le déploiement de l'aviation durable, notamment par la mise en place de systèmes de soutien tels que des partenariats publics-privés.

9. Soutenir la création d'un label reconnaissant les compagnies aériennes responsables sur le plan de l'environnement

L'EASA (*European Union Aviation Safety Agency*) a proposé en 2019 de créer un label environnemental volontaire (Airline label) permettant aux passagers d'être informés et de reconnaître les efforts déployés par les compagnies aériennes dans le domaine environnemental.

Équilibre des Énergies appelle à soutenir cette initiative et à la faire aboutir dès que possible, en prenant en compte, parmi les critères d'attribution du label, les efforts faits par les compagnies pour réduire leurs émissions et en particulier les émissions de CO₂.

Équilibre des Énergies appelle également à étudier les mesures, telles que des réductions de taxes d'aéroport ou de redevances de survol, qui pourraient permettre de reconnaître l'effort fait par les compagnies pour respecter les conditions d'octroi du label.

10. Accélérer les études sur les effets non CO₂

Il est admis que le recours accru aux SAF aura un effet bénéfique sur les effets non CO₂. Ils contiennent moins de composés aromatiques et donc génèrent moins de suies qui sont des précurseurs de la formation des traînées de condensation. Cependant, les effets non CO₂ sont des phénomènes complexes qui sont encore mal connus. Des études additionnelles sont nécessaires afin d'être en mesure d'élaborer des stratégies d'adaptation des trajectoires de vol et éviter les zones propices à la formation des traînées, sans allonger excessivement les trajets.

Équilibre des Énergies recommande de les mener à la fois au niveau français et au niveau européen, afin de mieux connaître les mécanismes de formation des traînées ainsi que les autres effets non CO₂ qui peuvent s'y ajouter. ●



Air France-KLM atteindra le « zéro émission nette » en 2050

Anne-Marie Couderc,
présidente non exécutive d'Air France-KLM

Comme toutes les compagnies aériennes, Air France a beaucoup souffert de la crise de la Covid. Notre première question va de soi : comment se porte le Groupe Air France-KLM aujourd'hui ?

Anne-Marie Couderc : Le groupe Air France-KLM a connu au cours des deux dernières années le plus gros choc de son histoire. La crise Covid a provoqué, en 2020, un bond de 25 ans en arrière en termes de trafic. La crise profonde et persistante de la Covid-19 a très clairement accentué le besoin de transformation et nous avons accéléré la mise en œuvre de notre plan avec pour objectif de repositionner Air France-KLM au niveau de rentabilité de ses pairs en Europe et d'accélérer notre transition durable. Nous ne sommes jamais restés dans l'expectative de la remontée des trafics. Au contraire, nous avons accéléré sur tous les aspects de notre stratégie et de notre transformation. L'engagement de nos équipes a été total tout au long de cette période difficile et je tiens à les en remercier.

Comment voyez-vous l'évolution du trafic aérien à plus long terme ? La réponse à la préoccupation environnementale est-elle un élément fort de votre stratégie ? L'attitude des jeunes et le développement du *flygskam*, la honte de prendre l'avion, sont évidemment un sujet de préoccupation. Comment y répondez-vous ?

A.-M. C. : Le transport aérien a démontré dans la crise de la Covid toute sa dimension stratégique : opérations de rapatriement, transport de masques, de vaccins et aujourd'hui de soignants. Alors que nous nous transformons, notre environnement change également et nous sommes pleinement conscients de notre empreinte environnementale. Au cours des 18 derniers mois, le contexte de pandémie a accéléré la prise de conscience environnementale. Le rapport au voyage évolue et une vision plus durable émerge : des voyages moins fréquents, plus longs, combinant des déplacements professionnels



et des voyages d'agrément. Le secteur aérien fait face à un double défi, économique et environnemental. La dynamique de la relance sera aussi une dynamique d'innovation. La crise de la Covid n'a pas éteint l'envie et la curiosité du voyage et de la découverte de l'autre. Cela me rend optimiste sur l'avenir du transport aérien, à condition qu'il réussisse sa transition vers un modèle plus durable.

Comment la crise a-t-elle fait évoluer vos ambitions et vos objectifs en matière de réduction des émissions de CO₂ ?

A.-M. C. : Air France-KLM a entamé sa transition écologique il y a plus de 15 ans. Nous n'avons pas attendu que ce sujet soit au cœur du débat public pour prendre des engagements que nous renforçons aujourd'hui. C'est aujourd'hui une de nos priorités stratégiques et c'est une attente forte de nos clients, de nos salariés et de nos actionnaires. Notre ambition environnementale s'illustre par une feuille de route concrète, réaliste et transparente. Les objectifs du groupe Air France-KLM sont clairs : réduire de 30 % nos émissions de CO₂ par passager/km d'ici 2030 par rapport à 2019 et atteindre le « zéro émission nette » en 2050. Et dès 2030, atteindre le « zéro émission

nette » pour nos activités au sol. C'est une trajectoire ambitieuse et exigeante que nous avons soumise à validation auprès de l'organisme indépendant « *Science-Based Target Initiative* » qui doit confirmer son alignement à l'Accord de Paris. Chacune de nos compagnies contribuera à l'atteinte de cet objectif, KLM à travers son programme *Fly Responsibly* et Air France avec le lancement récent du programme *Air France Act*, présentant sa nouvelle trajectoire de réduction des émissions de CO₂.

Tous ces objectifs restent lointains, comment résoudre ces problèmes dès maintenant ? Concrètement, qu'est-ce qui peut changer sur le court terme ?

A.-M. C. : Nous avons deux leviers majeurs et prioritaires : le renouvellement de la flotte et l'incorporation de carburants d'aviation durables. À court terme, le renouvellement de la flotte est le levier le plus efficace de réduction des émissions de CO₂. L'arrivée dans la flotte d'Air France-KLM de nouveaux appareils est un symbole fort de notre responsabilité environnementale. C'est pourquoi, malgré le contexte difficile que nous traversons, nous continuons de consacrer 80 % de nos investissements à l'acquisition de nouveaux appareils : Airbus A350 pour le long-courrier, Airbus A320neo et Airbus A220 pour le moyen-courrier, qui émettent jusqu'à 25 % de CO₂ en moins et dont l'empreinte sonore est réduite de 33 à 50 % selon les appareils.

C'est aussi dans tous nos métiers que se joue la transformation durable de nos activités. Nous déployons tous les leviers actuellement disponibles qui nous permettent au quotidien de limiter au maximum nos émissions de gaz à effet de serre (optimisation des trajectoires de vol et de la masse embarquée dans nos avions, suppression du plastique à usage unique, recyclage systématique de nos déchets).

Et les émissions que nous ne pouvons pas réduire, nous les compensons. Nos vols domestiques et internationaux sont soumis aux mécanismes réglementaires de l'ETS et de CORSIA, auxquels s'ajoutent une compensation volontaire et proactive de notre part s'agissant des vols domestiques.

La loi climat-résilience a instauré des restrictions pour le secteur aérien, notamment pour les vols court-courrier. Pensez-vous que ces dispositions aillent dans la bonne direction ?

A.-M. C. : L'avion a joué pendant des décennies un rôle indispensable d'aménagement du territoire, et il reste aujourd'hui un levier de désenclavement

Nous avons deux leviers majeurs et prioritaires : le renouvellement de la flotte et l'incorporation de carburants d'aviation durables

pour certaines régions françaises. Air France a pris l'engagement de réduire ses émissions de CO₂ sur le réseau domestique de 50 % d'ici 2024. À ce titre et dans le cadre des engagements pris au printemps 2020 lors de l'octroi des prêts par l'État français, Air France a cessé d'opérer les lignes au départ d'Orly lorsqu'une alternative en train existe, à moins de 2 h 30 : Orly-Nantes, Orly-Lyon et Orly-Bordeaux. Nous avons donc déjà arrêté les lignes visées par la loi climat-résilience.

Je crois profondément en la vertu de l'intermodalité. Nous ne sommes pas dans une logique d'opposition mais de complémentarité, afin de privilégier les options de trajets bas carbone quand elles existent. Air France et la SNCF sont partenaires depuis 25 ans, le TGV ayant déjà pris la place de l'avion sur les liaisons vers Lille ou Strasbourg depuis longtemps. Les liaisons vers le hub de Paris-Charles de Gaulle ont été conservées, pour préserver la connectivité au reste du monde.

Sur le long terme, l'aviation décarbonée est-elle concevable ? Et si oui comment ? L'avion à hydrogène vous semble-t-il crédible ?

A.-M. C. : Au-delà du renouvellement de la flotte, le premier levier de décarbonation est l'utilisation de carburants d'aviation durables (SAF). Ces carburants peuvent réduire l'empreinte des vols jusqu'à 80 % sur l'ensemble de leur cycle de vie. L'achat de carburant représente entre 20 et 30 % de notre structure de coûts, il est donc évident que le prix des SAF sera déterminant dans notre capacité à accélérer notre incorporation.

Nous mettrons tout en œuvre pour soutenir la création d'une filière de SAF en France et en Europe pour atteindre une autonomie énergétique, à des conditions économiques viables pour l'ensemble des acteurs.

Dans le cadre du *Green Deal*, nous travaillons avec le gouvernement et les parties prenantes pour convaincre de la nécessité de développer cette filière de SAF équitable en France et en Europe et de corriger les risques de fuites de carbone et de distorsions de concurrence.

L'utilisation des énergies nouvelles comme l'hydrogène est en même temps un levier essentiel de la transition énergétique. Les avions intégrant ces innovations (hydrogène, électrique) ne seront pas disponibles avant 2040, et ne concerneront que les courtes et moyennes distances. C'est pour cela que l'incorporation de carburants d'aviation durables est le seul moyen de décarboner le long-courrier à moyen terme : c'est la moitié de l'effort d'ici 2050.

L'UE et la France en particulier ont l'opportunité de jouer un rôle pionnier dans le développement •••



S&P Global Ratings a attribué à Air France-KLM une évaluation ESG de 64/100. Avec cette note, le groupe est bien positionné parmi les acteurs de l'industrie aérienne quant à la gestion de son exposition aux défis environnementaux

des technologies du futur : l'hydrogène et les e-fuels. Travailler dès maintenant, c'est anticiper la réussite de la transition écologique de notre secteur dans les quinze années à venir.

Les engagements en matière de protection de l'environnement laissent parfois sceptiques. Comment le groupe Air France-KLM s'y prend-il pour évaluer et faire certifier ses résultats ?

A.-M. C. : Nous assumons une démarche transparente, honnête et responsable vis-à-vis de nos clients, nos actionnaires et l'ensemble de nos collaborateurs et de nos partenaires.

Notre groupe est évalué par des agences de notation ESG de manière non sollicitée et bénéficie globalement de bonnes notations par rapport à ses pairs. Il y a quelques semaines, nous avons souhaité obtenir une notation ESG sollicitée afin d'améliorer notre stratégie et nos pratiques sur ce sujet. S&P Global Ratings a attribué à Air France-KLM une évaluation ESG de 64/100. Avec cette note, le groupe est bien positionné parmi les acteurs de l'industrie aérienne quant à la gestion de son exposition aux défis environnementaux.

Nous venons également de rejoindre l'initiative SBTi (*Science-Based Targets*) pour nous doter d'objectifs basés sur la science et conformes aux ambitions de l'Accord de Paris pour limiter le

réchauffement climatique bien en-dessous de 2°C. Nous sommes un des premiers groupes aériens européens à choisir de faire valider sa trajectoire de décarbonation par SBTi. Nous assumons une évaluation scientifique de nos ambitions et un engagement supplémentaire de réduction de CO₂ à horizon 2030-2035, en complément de celui d'atteindre zéro émission nette en 2050. C'est un engagement très important pour le groupe.

Seriez-vous favorable à l'institution d'un label qui pourrait être accordé aux compagnies aériennes les plus respectueuses de la préoccupation climatique ?

A.-M. C. : Un tel label pourrait avoir une utilité, à la fois pour les compagnies aériennes et pour leurs clients, pourvu qu'il soit réellement représentatif des actions mises en place en matière environnementale. C'est une tâche complexe, car il n'existe pas d'indicateur unique qui reflète les réels efforts de la filière, selon que l'on considère par exemple les émissions en valeur absolue, ou les émissions rapportées à un passager, ou bien encore les évolutions de ces valeurs d'émissions.

Il devrait également refléter les autres actions environnementales (réduction des déchets, du bruit, etc.), et même plus largement l'implication des acteurs de l'industrie en matière de développement durable, dont le programme de développement durable de l'ONU, constitué de 17 objectifs.

Le respect de l'environnement est un plus dans la compétition internationale. Mais il a un coût et un excès de zèle peut être très préjudiciable à la compétitivité du groupe Air France-KLM.

Quel regard portez-vous sur les dispositions proposées par la Commission européenne dans le paquet *Fit for 55* et pensez-vous qu'elles doivent être infléchies ?

A.-M. C. : Nous avons accueilli favorablement le paquet *Fit for 55*. La décarbonation de l'industrie doit passer par l'utilisation progressive d'une part croissante de carburants d'aviation durables. *Fit for 55* réaffirme également l'importance de l'ETS dans le pilotage des objectifs européens de réduction des émissions des gaz à effets de serre.

Nous sommes plus réservés sur la mesure de taxe sur le kérosène. Dans la mesure où les recettes fiscales issues de cette taxe ne seraient pas affectées à des projets de réduction des émissions, sa mise en place représenterait un poids supplémentaire considérable pour le secteur, alors même qu'il devrait financer par ailleurs sa transition environnementale.

Restons également vigilants quant aux effets de distorsion de concurrence qui accompagneraient ces mesures si le reste du monde ne suivait pas l'ambition européenne, ou bien si certains pays subventionnaient la transition environnementale de leur secteur. Des risques de distorsion peuvent apparaître sur les flux de trafic intercontinentaux avec des compagnies extra-communautaires, disposant de plates-formes de correspondance (hubs) situées hors d'Europe et échappant en partie aux contraintes environnementales qui pèsent sur les acteurs européens et sans gain réel pour le climat au plan mondial.

Selon nous, les mesures de *Fit for 55* doivent donc être accompagnées de mécanismes permettant de contrer ces risques de distorsions de concurrence et de fuites carbone.

L'OACI se réunira en assemblée générale en septembre 2022. Quel rôle peut-elle jouer dans la décarbonation du transport aérien, au travers du système de compensation CORSIA notamment ?

A.-M. C. : Le cadre international est par nature le cadre adapté pour traiter de la question de la réduction des émissions de gaz à effets de serre, en lien avec les objectifs de l'Accord de Paris.

« *Tout seul on va plus vite, ensemble on va plus loin* » : malgré la complexité inhérente aux discussions multilatérales, les États européens, qui sont à la pointe de l'ambition environnementale sur le plan international, doivent selon nous continuer à promouvoir le renforcement des objectifs et dispositifs mondiaux concernant l'action du transport aérien pour le climat. Même si aujourd'hui l'ambition du programme CORSIA de l'OACI peut paraître insuffisante à certains égards, notamment par rapport aux objectifs européens, CORSIA est entré dans sa phase pilote en 2021, couvrant environ 77 % du trafic international

Nous travaillons main dans la main avec tous les acteurs de la chaîne de valeur pour permettre l'émergence d'une filière de production française de carburants d'aviation durables, prérequis indispensable à la généralisation de leur utilisation dans les aéroports français

mondial. En 2027, lors de la mise en œuvre de la deuxième phase, CORSIA couvrira plus de 90 % du trafic international. Ce succès est la preuve que la définition d'objectifs et de dispositifs communs au niveau international est possible.

CORSIA vise actuellement à plafonner les émissions à l'échelle internationale au travers de mesures de compensation. Pour accentuer son action, et induire une baisse des émissions à l'échelle mondiale, nous appelons à ce que l'OACI mette en place un mandat mondial d'incorporation de biocarburant. Cela constituerait une avancée majeure en matière de décarbonation et un signal utile à la filière de production de carburants d'aviation durables.

Comment le groupe Air France-KLM peut-il influencer le secteur dans sa globalité ?

A.-M. C. : Nous avons une conviction : la réponse aux enjeux de durabilité ne peut être que collective. Nous travaillons avec l'ensemble des acteurs de notre écosystème : aviateurs, aéroports, fournisseurs de carburant, autorités du contrôle aérien et pouvoirs publics pour atteindre des objectifs sans cesse plus ambitieux.

Nous travaillons main dans la main avec tous les acteurs de la chaîne de valeur pour permettre l'émergence d'une filière de production française de carburants d'aviation durables, prérequis indispensable à la généralisation de leur utilisation dans les aéroports français.

Après avoir joint nos efforts avec TotalEnergies et le Groupe ADP pour réaliser un premier vol long-courrier vers le Canada alimenté en SAF produit en France en mai dernier, nous avons renouvelé l'opération le 1^{er} octobre 2021 (Air France, TotalEnergies, la métropole et l'aéroport Nice Côte d'Azur) pour réaliser un vol Nice-Paris alimenté à 30 % de carburant d'aviation durable, produit par TotalEnergies dans ses usines françaises.

Toutes ces réalisations collectives sont indispensables pour soutenir et développer une filière française de production de carburants d'aviation durables. ●



La transition écologique est au cœur de la stratégie d'Airbus

Guillaume Faury,
président d'Airbus

Le secteur aérien, après avoir connu une fantastique croissance, a été soumis à la critique de mouvements écologistes et a dû faire face aux conséquences de la crise sanitaire de la Covid. Êtes-vous confiant sur les possibilités de reprise et de quels atouts le secteur aérien peut-il aujourd'hui se prévaloir ?

Guillaume Faury : L'industrie aéronautique commence tout juste à émerger de la crise la plus grave et la plus longue de son histoire avec deux défis majeurs à relever dans un avenir proche : se remettre durablement de la crise de la Covid et se reconstruire en s'engageant résolument dans la décarbonation du secteur qui nécessitera un effort sans précédent en matière d'innovation et d'investissement.

L'aviation offre des atouts considérables à la société, en soutenant la coopération internationale, le développement économique et le partage des cultures à travers le monde. Elle relie les territoires et les gens, de plus en plus nombreux à avoir accès au transport aérien sur de courtes ou de longues distances. Depuis qu'elle existe, l'aviation a permis aux gens de voyager, de travailler, de se connecter et d'échanger, remplissant un rôle vital pour nos sociétés.

Ce rôle s'inscrit dans un avenir durable. À travers l'*International Air Transport Association* (IATA) et l'*Air Transport Action Group* (ATAG), l'ensemble du secteur aérien s'est engagé à atteindre la neutralité carbone d'ici 2050 et nous croyons en notre capacité d'innovation pour relever ce défi.

Quel rôle joue la transition écologique dans la stratégie d'Airbus et quelles sont les grandes étapes que vous vous êtes fixées ?

G. F. : La transition écologique est au cœur de la stratégie d'Airbus et de notre raison d'être : nous avons l'ambition d'être les pionniers d'une industrie aéronautique et spatiale durable, pour un monde sûr et uni. Nous avons pris des engagements forts pour réduire l'impact environnemental de nos activités et de nos appareils depuis leur conception jusqu'à leur fin de vie.

L'un de nos engagements les plus marquants vise à mettre en service le premier avion commercial zéro émission vers 2035. Pour rendre possible cette nouvelle technologie, il faudra stimuler la mise en place d'un écosystème garantissant la disponibilité de l'hydrogène au sein des aéroports et des infrastructures existantes, mais aussi financer la recherche – y compris par le soutien des politiques publiques – et définir des cadres réglementaires applicables à l'ensemble de l'industrie.

Avant de parler prospective, les avions classiques vous semblent-ils pouvoir encore progresser ?

G. F. : Aujourd'hui, seulement 13 % des flottes en service sont constitués d'avions de dernière génération. Moderniser les 80 % restants avec des appareils 20 à 25 % plus économes en carburant réduira considérablement les émissions mondiales du secteur jusqu'à la mise en service de la nouvelle génération d'avions. Cette dernière arrivera au cours de la prochaine

Vol en formation de la flotte Airbus A220-300, A319neo, A330neo et A350-1000.

© Airbus - Sylvain Ramadier



Airbus a un long passé en matière d'innovation et nous poursuivons nos efforts avec des avancées sur les nouvelles architectures avion et systèmes de propulsion, ou les vols en formation

décennie et intégrera diverses améliorations technologiques dans les nouveaux matériaux, les systèmes de propulsion, les ailes, l'aérodynamisme et l'adaptation aux carburants aériens durables.

Les performances énergétiques et environnementales de vos avions sont évidemment un facteur de compétitivité essentiel par rapport à la concurrence. Airbus est-il toujours aux avant-postes de la technologie, vis-à-vis de ses concurrents américains et chinois notamment ?

G. F. : Les succès commerciaux récents démontrent la compétitivité et l'attractivité de nos produits, rendues possibles par la technologie. Notre ambition est de garder cette avance technologique vis-à-vis de nos concurrents.

C'est pourquoi nous considérons qu'il est vital de poursuivre la recherche dans les technologies de

rupture et les solutions opérationnelles pour décarboner les produits existants et futurs. Airbus a un long passé en matière d'innovation et nous poursuivons nos efforts avec des avancées sur les nouvelles architectures avion et systèmes de propulsion, ou les vols en formation. Nous soutenons aussi activement le développement à grande échelle des énergies alternatives, en particulier les carburants aéronautiques durables et les solutions à base d'hydrogène décarboné.

On parle beaucoup de l'avion à hydrogène. Pensez-vous que cette technologie émergera et pourra représenter une part significative du transport aérien ?

G. F. : Oui, nous en sommes convaincus. L'hydrogène est une des technologies zéro émission les plus prometteuses. Produit à partir d'énergies décarbonées, il n'émet pas de CO₂ dans l'atmosphère, que ce soit pendant l'exploitation de l'appareil ou lors de la production de l'énergie. Airbus se concentre pour l'instant sur des avions court et moyen-courrier, tout en anticipant les technologies pour aller au-delà, dans un second temps.

L'adoption de l'hydrogène à grande échelle devrait être facilitée par la baisse significative de son coût au cours de la prochaine décennie. Nous soutenons le développement d'une économie de l'hydrogène et le concept de hub à hydrogène dans les aéroports. ...



Tous nos avions sont déjà certifiés pour voler avec un mélange de carburant comprenant jusqu'à 50 % de SAF, sans modification technique ni impact sur les opérations et la maintenance

Nous estimons à ce titre que l'aviation devrait être incluse dans les stratégies hydrogène des États, en Europe et dans le monde.

Quelles perspectives voyez-vous pour l'avion électrique ?

G. F. : Cette technologie peut être efficace pour les petits avions. La prochaine génération de véhicules aériens urbains d'Airbus en sera équipée, à la suite des démonstrateurs Vahana et CityAirbus. Mais pour un avion commercial comme l'A320, le poids des batteries pour délivrer suffisamment de puissance et d'énergie est un obstacle infranchissable aujourd'hui.

Cependant, nous envisageons d'utiliser plus de batteries à bord pour fournir de l'énergie électrique à certains systèmes embarqués et alimenter des fonctions non propulsives, en vol et lors des opérations au sol.

La réduction de l'utilisation des moteurs thermiques qui en découle se traduit par une diminution de l'empreinte CO₂ des appareils.

Il semble bien que la voie principale de décarbonation du secteur aérien à court terme soit l'utilisation des carburants durables, les SAF, venant en substitution au kérosène. Les appareils Airbus sont-ils aujourd'hui compatibles ou bien s'agit-il d'un nouveau saut technologique ? Quelles sont les étapes aujourd'hui programmées ?

G. F. : La substitution de kérosène fossile par du carburant aéronautique durable induit une réduction des émissions de CO₂ allant jusqu'à 80 %. Les SAF sont donc une solution incontournable en matière de réduction des émissions dans les années qui viennent.

Depuis 2008, Airbus a joué un rôle important dans l'adoption et la certification des SAF grâce à des vols tests et des partenariats stratégiques. Tous nos avions sont déjà certifiés pour voler avec un mélange de carburant comprenant jusqu'à 50 % de SAF, sans modification technique ni impact sur les opérations et la maintenance. Depuis 2011, plus de 350 000 vols commerciaux ont utilisé des SAF.

Notre objectif est d'atteindre la certification 100 % SAF sur l'ensemble de notre gamme avant la fin de la décennie. Pour y parvenir, Airbus mène des programmes de recherche tels que ECLIF3 sur A350 et VOLCAN sur A319. Ces projets nous permettront

aussi d'affiner notre compréhension des effets positifs de ces carburants sur la réduction des émissions autres que le CO₂.

Tout aussi essentielle sera la mise en place d'un écosystème permettant le développement de la filière de production et d'approvisionnement en ce type de carburant, et ce, au niveau international. Airbus s'est donc engagé dans des partenariats public-privé pour accélérer l'émergence de cet écosystème.

Le secteur aérien est en Europe et particulièrement en France une filière industrielle d'excellence. Quelles sont les conditions pour qu'elle poursuive son développement et conserve son leadership sur le plan international ?

G. F. : Le secteur aéronautique et spatial est en effet une filière d'excellence en Europe et en France, avec quelques grands champions, qui sont des leaders mondiaux dans leur domaine, et des milliers de petites et moyennes entreprises réparties sur tout le territoire et qui sont les dépositaires d'un savoir-faire exceptionnel. Rien qu'en France, le secteur représente plus de 300 000 emplois directs et un million d'emplois induits et génère annuellement quelque 20 milliards d'euros d'excédents commerciaux.

Pour le préserver, il faut tout d'abord soutenir la recherche et l'innovation. C'est ce que font l'État, au niveau du CORAC, et les régions grâce aux IRT et à leurs aides aux petites et moyennes entreprises pour innover et se développer. Il faut aussi garder la compétitivité de l'industrie européenne. Cela passe par la stimulation de l'investissement, notamment dans les nouvelles technologies et les nouvelles énergies. Cela dépend aussi de la capacité des autorités à éviter une superposition de règlements ou de taxes qui étoufferaient le secteur au lieu de favoriser sa transition écologique. Nous sommes par exemple contre une taxation du kérosène qui viendrait se superposer au système des ETS européens, qui représente déjà un prix carbone pour l'aviation supérieur à 80 € la tonne de CO₂.

Qu'attendez-vous de l'Europe aujourd'hui et en particulier des discussions autour du paquet Fit for 55 ?

G. F. : L'industrie aéronautique européenne a défini une feuille de route claire pour la décarbonation du secteur avec le rapport Destination 2050 et l'ambition d'atteindre zéro émission nette pour tous les vols à l'intérieur et au départ des aéroports de l'Union européenne. Nous soutenons tous les objectifs de ce rapport qui sont en ligne avec l'objectif de réduction des émissions de CO₂ de l'UE de 55 % en 2030 comme à celui de la neutralité carbone en 2050.

Mais pour parvenir à ces objectifs, il est essentiel que le secteur puisse se remettre à court terme de la Covid. C'est pourquoi nous demandons à l'Europe

Dans le domaine de la décarbonation aérienne, nous avons besoin de conditions de concurrence équitables et communes à l'échelle mondiale

de veiller à fournir un cadre réglementaire et financier permettant au transport aérien de se redresser et d'opérer durablement, en visant un bon équilibre entre le soutien à l'investissement d'une part, et une réglementation environnementale d'autre part, pour assurer la compétitivité et la pérennité de l'aviation européenne.

La 41^e session de l'assemblée de l'OACI se tiendra du 27 septembre au 7 octobre 2022. Qu'en attendez-vous et peut-on espérer voir se créer un mouvement d'ensemble permettant d'adopter des règles communes ?

G. F. : Nous avons besoin dans le domaine de la décarbonation aérienne de conditions de concurrence équitables et communes à l'échelle mondiale. L'OACI a un rôle essentiel à jouer car elle est la seule en capacité de créer ces conditions. Nous attendons d'elle qu'elle définisse des objectifs à long terme pour l'aviation et établisse un *level playing field* par des règles du jeu communes à ses 193 États membres autour des questions environnementales, de la même manière qu'elle l'a fait avec un grand succès sur les questions de sûreté et de sécurité ou sur le programme de compensation carbone CORSIA.

Nous avons sans doute l'opportunité de créer une alliance forte entre l'Union européenne et les États-Unis autour des objectifs à long terme de l'OACI et de son ambition pour le climat. Mais il faudra y associer les autres pays qui pourraient avoir des ambitions un peu différentes et qui se posent la question des moyens pour les atteindre. Il est essentiel de les impliquer dès le début dans les discussions pour déboucher, lors de l'assemblée de 2022, sur un accord fort qui aura un impact réel.

L'industrie a déjà démontré à travers l'ATAG qu'elle peut se regrouper, se rassembler et travailler à des solutions concertées face à des problématiques communes. Sur un objectif aussi ambitieux, il sera très important pour les États de travailler avec l'industrie pour avancer ensemble vers un consensus. Les discussions qui se tiendront dans les mois à venir seront donc essentielles pour une issue positive à l'OACI en 2022. ●

Réinventer l'aviation



Il n'est pas nouveau de voir le secteur aéronautique attaqué par les prédicateurs extrémistes de la décarbonisation. Il est recommandé aux citoyens de prendre le train plutôt que l'avion et les compagnies aériennes sont encouragées à réduire leur nombre de vols...

Marian-Jean Marinescu,
eurodéputé, coordinateur du groupe PPE au sein de la commission des transports (TRAN) du Parlement européen

Ces chantres de la décarbonation argumentent du fait que les vols court-courrier peuvent être remplacés par des trajets en train, certes plus longs, mais plus respectueux de l'environnement. Dans ce climat dogmatique et hostile aux industries polluantes, l'aviation doit se réinventer : développer des avions électriques ou des moteurs moins gourmands en carburant et, de plus, capables d'intégrer un volume plus important de carburants alternatifs.

Historiquement, l'aviation a toujours été un espace d'innovation. Je suis convaincu que la recherche et l'innovation seront essentielles pour la réinventer et même pour la sauver. C'est en substance ma ligne de conduite sur le paquet législatif *Fit for 55* : favoriser et encourager l'investissement dans la recherche et l'innovation.

PASSER DES IDÉES AUX SOLUTIONS

Le 23 novembre 2021, j'ai animé une table ronde virtuelle avec tous les acteurs impliqués dans la décarbonisation de l'aviation européenne, de l'EASA à la DG Move, en passant par l'ASD, Airbus, Neste SAFRAN, etc. La pandémie a gravement affecté le secteur de l'aviation. Cependant, le grand défi est à présent celui du *Green Deal* et de la décarbonation. De bonnes nouvelles nous viennent de l'industrie : Airbus annonce que son premier avion à hydrogène sera prêt en 2035. Bien ! Mais cette déclaration me semble très audacieuse car le déploiement de l'hydrogène présente de nombreuses difficultés.

Une autre difficulté est liée à la crise du fret. Airbus, par exemple, a des fournisseurs dans le monde entier

or le coût du transport de fret a été multiplié par 20, en grande partie en raison de la crise des conteneurs bloqués aux États-Unis et en Chine. À cause de la pandémie, il n'y a pas assez de personnel pour décharger des navires qui font la queue par centaines dans les ports américains ou chinois.

Les grandes entreprises comme Airbus ont un projet clair pour l'avenir et proposent la neutralité climatique en 2050. Mais Airbus a les moyens d'investir dans la recherche et le développement, ce qui signifie qu'elle s'adaptera plus facilement au défi du *Fit for 55*, de même que SAFRAN, dont les moteurs sont d'ores et déjà capables d'intégrer jusqu'à 50 % de carburant alternatif. La question est de savoir comment les autres entreprises, qui n'ont pas l'assise et la puissance financière d'Airbus et de SAFRAN, s'adapteront à ces défis. Au Parlement européen, nous essaierons, à travers les textes de loi que nous adopterons, de faciliter cette transition pour toutes les entreprises européennes.

LE CIEL UNIQUE EUROPÉEN PERMET UNE RÉDUCTION DES ÉMISSIONS DE CO₂ DE 10 %

Une autre voie pour la réduction des émissions de gaz à effet de serre issues de l'aviation consiste à mettre en œuvre le ciel unique européen (*Single European Sky*, SES). Cet automne, j'ai assisté pour la première fois à la conférence annuelle sur la sécurité aérienne (*Aviation Safety Conference*). Elle s'est déroulée à Cologne et j'y ai été invité en tant que rapporteur du Parlement européen dans le dossier SES pour parler du contrôle du trafic aérien. J'ai pu constater que la filière est très largement favorable à la mise en œuvre rapide du nouveau système de contrôle du trafic aérien. Ce n'est pas étonnant : le SES est un moyen sûr et simple de décarboner l'aviation. Toutes les études montrent que la mise en œuvre du SES peut conduire à une réduction d'environ 10 % des émissions de CO₂. En parallèle, le secteur aérien a la possibilité de développer les projets dont nous

avons parlé plus haut pour réduire ses émissions. Comme je l'ai souligné, l'optimisation du trafic aérien permet à elle seule de réduire de 10 % les émissions de gaz à effet de serre du secteur. Juste un exemple : réduire ne serait-ce que d'un quart d'heure un trajet normalement prévu pour deux heures, grâce à l'optimisation du trafic aérien, permet de réduire de 10 % le CO₂ émis, grâce au carburant économisé.

Il me semble que nous devons collecter en quantités massives et de façon méthodique les matières premières stratégiques qui seront nécessaires à la production de carburants aériens alternatifs dans les prochaines années

Malheureusement, cette solution simple pour la réduction des émissions de gaz à effet de serre n'est pas soutenue par certains États membres. D'où vient cette opposition dans un moment où la nécessité de réduire nos émissions est proclamée par tous ? C'est, pour moi, en tant que rapporteur SES, assez incompréhensible. À l'heure où cet article est publié, les pilotes ont la possibilité d'utiliser un logiciel leur indiquant, entre deux routes, laquelle permet d'émettre le moins de CO₂. Ce système existe déjà dans plusieurs États membres, c'est pourquoi je ne comprends pas pourquoi certains d'entre eux considèrent que le SES va à l'encontre de leur souveraineté nationale.

Le vrai nœud du problème, c'est le coût de mise en œuvre du SES, c'est la question des redevances de survol que les passagers doivent payer – car ce sont bien eux qui les payent et non les compagnies aériennes – lorsqu'un avion survole un État membre. La conférence de Cologne m'a confirmé que la majorité de la filière aéronautique partage ma ligne politique sur le dossier du SES. Je suis confiant dans le fait que les négociations avec la présidence française du Conseil de l'UE permettront de progresser sur ce dossier.

LA MOBILITÉ : UN DROIT EUROPÉEN FONDAMENTAL

Malheureusement, du fait de ces blocages dans les négociations sur le SSE, les réductions des émissions de gaz à effet de serre auxquelles nous devons aboutir risquent de résulter plus de la limitation des mobilités que de l'optimisation du trafic aérien.

C'est une forme d'hypocrisie de la part d'États membres qui d'un côté font valoir leur engagement

climatique lors de la COP de Glasgow et de l'autre font preuve d'un manque de volonté politique face à une proposition concrète pour réduire les émissions de gaz à effet de serre de la filière aérienne. Un exemple qui illustre la situation actuelle dans l'Union européenne : les déclarations sont une chose, la mise en œuvre des politiques en est une autre.

Je reste néanmoins convaincu que la mobilité est un droit européen fondamental et que nous ne devons pas permettre qu'il soit limité. La limitation de la mobilité ne peut pas être la solution pour la réduction des émissions de gaz à effet de serre. En ce qui me concerne, en tant que coordinateur PPE dans la commission des transports TRAN et négociateur sur le SES, je poursuivrai mes efforts et mes échanges avec les ambassadeurs des différents États membres ainsi qu'avec les directions de l'aviation civile. J'espère progresser vers l'adoption d'un texte qui soit conforme aux engagements des États membres et de l'UE en matière de décarbonation tout en maintenant les possibilités de mobilité offertes aux citoyens.

LUTTEZ POUR VOS SOLUTIONS !

Bien que le système d'échange des quotas d'émission carbone (l'EU-ETS) soit souvent acclamé, il ne me semble pas qu'il offre une garantie de succès quant à l'objectif pour lequel il a été institué, à savoir la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Le système ETS est-il une solution appropriée pour le secteur aérien ? Pas encore ! Ce système a été mis en place dans des secteurs pour lesquels des solutions de décarbonation existaient déjà. Dans l'industrie automobile par exemple, des alternatives sont sur le marché : les biocarburants, les moteurs électriques, les véhicules hybrides... Ce n'est pas le cas dans l'aviation. Pas encore. Il me semble que nous devons collecter en quantités massives et de façon méthodique les matières premières stratégiques qui seront nécessaires à la production de carburants aériens alternatifs dans les prochaines années. Je ne pense pas que l'augmentation de la fiscalité dans le secteur aérien donnera des résultats probants. En outre, il faut que les fonds collectés par le système ETS aillent à l'industrie. Je recommande d'attribuer 95 % de ces fonds à la filière et seulement 5 % au budget européen.

Enfin, je dirais que le moment est venu pour l'industrie de présenter son point de vue à tous les groupes politiques et à toutes les commissions du Parlement européen qui prendront des décisions relatives au paquet législatif *Fit for 55*. Expliquez-leur quelle est la situation réelle, présentez les plans que vous avez élaborés et éclairez-les sur les solutions qui peuvent être mises en œuvre. Il est dans notre intérêt à tous, législateurs, industriels et passagers, que l'aviation reste une des options disponibles pour exercer notre droit à la mobilité dans l'Union européenne. ●

Le secteur aéronautique est l'un des fleurons industriels français et doit le rester

Élément majeur de notre rayonnement international, le secteur aéronautique est une industrie vitale pour notre économie nationale, essentielle à notre balance commerciale. En tant que député de la capitale européenne de l'aéronautique, je ne peux que réaffirmer avec force son importance pour le dynamisme économique de la quasi-totalité de nos régions, pourvoyeuse de formations, d'emplois et de compétences de très haut niveau.



Jean-Luc Lagleize,
député, co-président du groupe
d'études Secteur aéronautique et
spatial de l'Assemblée nationale

Toutefois, je m'inquiète de la double crise que subit le secteur de l'aéronautique. La crise sanitaire de la Covid-19, qui a très largement fragilisé les chaînes de valeurs de la filière, a renforcé la crise morale que subit le monde aérien depuis déjà plusieurs années.

L'aviation a mauvaise presse. Pointée du doigt par les associations environnementales comme étant la grande responsable du changement climatique actuel, elle subit un aéro bashing violent qui remet en question son existence même ! Le développement du *Flygskam*¹ a un réel impact sur l'image publique de l'avion et, par conséquent, sur sa clientèle.

Or, force est de constater que la conviction de ces écologistes extrémistes se heurte à la réalité des chiffres.

3 %, c'est la part de gaz à effet de serre (GES) dont est responsable le monde de l'aviation au niveau international. La participation réelle du secteur au réchauffement climatique est bien moins importante que ce que veulent nous faire croire certains détracteurs. En comparaison, le monde du numérique produit 10 % des GES mondiaux.

Ce constat n'enlève rien au fait que le secteur aéronautique doit prendre ses responsabilités dans la lutte contre le réchauffement climatique. L'urgence climatique rend impérative l'accélération de la décarbonation de la filière. Mais la réduction du trafic aérien à laquelle certains écologistes appellent n'est pas une solution : l'industrie aéronautique doit

accélérer sa transformation et s'adapter aux enjeux environnementaux.

La décarbonation de l'aéronautique est devenue un nouvel enjeu de compétitivité mondiale, dans laquelle la France et l'Europe doivent développer un avantage concurrentiel décisif face aux rivaux américains ou chinois. Elle participe aussi à l'indépendance énergétique stratégique, une question brûlante et particulièrement d'actualité.

La décarbonation est une question de survie à laquelle la filière aéronautique ne peut plus échapper.

C'est dans cette conviction que j'ai souhaité m'engager, en tant que député, dans le développement de solutions concrètes pour parvenir à la transformation de l'industrie aéronautique. Pour cela, j'ai été nommé co-président du groupe d'études « secteur aéronautique et spatial » de l'Assemblée nationale. Ce statut m'a permis de travailler avec les acteurs concernés sur les différentes actualités politiques et législatives touchant à l'aéronautique.

En juin 2021, j'ai été nommé rapporteur de la mission d'information relative à l'avenir du secteur aéronautique en France. Cette mission me tient à cœur car elle a pour objectif de formuler des recommandations concrètes aux acteurs publics et privés pour adapter au mieux la filière aéronautique aux défis de notre époque.

1. Se traduit par « honte de prendre l'avion ».

Les auditions que j'ai réalisées avec ma collègue Sylvia Pinel sur un panel très diversifié d'acteurs de l'aéronautique, issus de tout le territoire français, m'ont très largement démontré que la prise de conscience de la nécessaire accélération de la décarbonation de l'industrie était réelle et collective. La proactivité des entreprises, conjuguée à l'engagement du gouvernement sur ce sujet, est très encourageante pour l'avenir de cette filière d'excellence française.

Deux enjeux principaux guident l'aéronautique dans son effort de décarbonation : le renouvellement des flottes et le développement de biocarburants.

Les entreprises de l'industrie aéronautique travaillent depuis toujours à l'optimisation des flottes de leurs clients : les nouveaux avions consomment 20 à 25 % de moins de carburant que la génération précédente et donc génèrent 20 à 25 % de GES de moins qu'auparavant.

En parallèle, certaines entreprises investissent dans le développement d'avions entièrement électriques, même si cette solution pourrait n'être adaptée que pour les courts courriers.

Un effort considérable est engagé sur le développement des biocarburants. Que ce soit pour les carburants aéronautiques durables (SAF) ou pour l'hydrogène, les énergéticiens développent un nouveau savoir-faire impressionnant qui redéfinit les contours de notre industrie française historique.

Un acteur a particulièrement retenu mon attention : le Conseil pour la recherche aéronautique civile (CORAC). Cet instrument de concertation entre État et industrie permet de synchroniser toutes les recherches technologiques et donc de nourrir efficacement la R&D engagée par les entreprises dans la décarbonation de leur activité.

Du côté des pouvoirs publics, le gouvernement français est engagé dans les objectifs européens de réduction des GES à moyen et long terme. Il a su prendre les engagements nécessaires, à la hauteur des enjeux de la filière aéronautique.

Les auditions que j'ai réalisées avec ma collègue Sylvia Pinel sur un panel très diversifié d'acteurs de l'aéronautique, issus de tout le territoire français, m'ont très largement démontré que la prise de conscience de la nécessaire accélération de la décarbonation de l'industrie était réelle et collective

La réponse à la crise sanitaire a été largement imprégnée de la volonté de transition écologique du transport aérien. Le plan de soutien de 15 milliards d'euros d'aides à destination de la filière a été suivi de la mise en place d'un fond d'accompagnement public à la diversification, à la modernisation et à la transformation environnementale des procédés de 300 millions d'euros.

D'autres engagements sont bénéfiques pour accompagner la décarbonation de l'industrie : la stratégie nationale hydrogène mise en place en septembre 2020, la taxe incitative sur le kérosène mise en place par le projet de loi de finances 2021 pour début 2022, France 2030 et son objectif de produire le premier avion bas carbone d'ici 2030, etc.

Toutefois, je ne peux cacher mes interrogations quant aux dispositions de la loi climat-résilience en termes de limitation des émissions du transport aérien.

Interdiction des liaisons aériennes dès lors qu'un trajet alternatif en train existe en moins de 2h30, encadrement du développement des capacités aéroportuaires, compensation carbone des émissions des vols intérieurs métropolitains pour tous les opérateurs aériens : ces mesures franco-françaises adoptées par le Parlement, appliquées à des entreprises françaises évoluant dans un environnement concurrentiel international, me paraissent à contre-courant de la situation compliquée à laquelle font face les secteurs aéronautiques et du transport aérien en raison de la crise sanitaire de la Covid-19.

Mon questionnement quelque peu solitaire m'a démontré le manque de communication efficace de la part du secteur aéronautique sur son engagement pourtant majeur dans la décarbonation de son activité. Le rapport qui émanera de cette mission d'information constituera, je l'espère, un coup de projecteur sur la transition écologique réelle de la filière.

La décarbonation du secteur aéronautique est un travail collectif. Entreprises et pouvoirs publics doivent se dégager des débats stériles sur la part de pollution du transport aérien pour se concentrer sur les innovations à développer et les engagements à prendre immédiatement et à poursuivre demain et après demain pour devenir un secteur décarboné exemplaire à l'horizon 2050.

Parce qu'il est nécessaire d'agir aujourd'hui pour pouvoir continuer à voler demain. ●



Aviation et transition : c'est maintenant qu'il faut agir

En quelques décennies, le transport aérien est devenu un transport de masse qui est passé de 9 millions de passagers en 1945 à plus de 4,5 milliards de passagers aujourd'hui (avant la crise de la Covid). 1 300 compagnies aériennes utilisent plus de 26 000 avions, à partir de 3 500 aéroports internationaux. Un avion décolle chaque seconde dans le monde et le trafic devrait doubler dans 15 ans pour atteindre 7 milliards de passagers et 220 milliards de t/km transportés. Une rupture comportementale et technologique est nécessaire...

Le transport aérien est devenu un produit de consommation comme un autre, surtout avec l'arrivée des *low cost* qui, à l'instar des supermarchés, proposent des produits d'appel. On se voit proposer des allers-retours en Europe à 49,99 euros. On voyage donc plus par opportunité que par nécessité ou même par agrément.

Et comme tous les produits de consommation, le transport aérien a des conséquences positives (recherche et développement, création d'emplois) et négatives (bruit et pollution). Il est nécessaire de conjuguer économie et écologie et le transport aérien devra sa survie à cette condition.

LA NÉCESSITÉ D'AGIR

Depuis quelques années, le public et les élus ont pris conscience des conséquences dues au transport aérien sur le réchauffement climatique. Des mouvements du type *flygskam* (honte de prendre l'avion) contribuent à une légère baisse du chiffre d'affaires du secteur aérien avec l'engagement fort de figures emblématiques telle que Greta Thunberg. Le ferroviaire, avec les TGV, est devenu

le plus gros concurrent du transport aérien court et moyen-courrier, même avec des tarifs similaires ou même supérieurs. Le transport aérien est pointé du doigt du fait de sa visibilité et de sa réputation de passagers-consommateurs privilégiés (les CSP +).

On ne peut donc rester indifférent à ce mouvement et il est plus que jamais urgent d'avoir une rupture technologique, autant qu'une rupture comportementale.

PROPULSION ET ÉNERGIES FOSSILES

Lorsque j'ai commencé ma carrière de pilote de ligne sur Caravelle, nous consommions environ 8 l/100 km par passager ; 30 ans plus tard, sur Airbus 330, nous en étions à quatre litres et bientôt nous en serons à deux !

Aujourd'hui, le transport aérien est responsable de 3 à 5 % des émissions de gaz à effet de serre, avec des rejets de tous ordres (CO₂, oxydes d'azote, dioxyde de soufre (SO₂), ozone (O₃), traînées de vapeur d'eau... sans compter les rejets divers comme les particules fines), tous résultant de la combustion du kérosène. Ces composés ont une influence négative sur la santé humaine, animale et végétale.



Gérard Feldzer,
président Aviation sans frontières, ancien commandant de bord, instructeur à Air France

UNE RUPTURE TECHNOLOGIQUE URGENTE

La dernière véritable rupture technologique a été le Concorde. Le challenge était de faire voler un avion à passagers supersonique chaque jour. Un défi et une magnifique machine, pleine d'innovations qui ont largement contribué aux Airbus. Mais, entre-temps, le bruit (120 décibels au décollage aux alentours des aéroports, le bang sonique...) et la pollution (10 l/100 km par passager) sont devenus insupportables pour une partie de la société. Sans compter les coûts d'entretien faramineux.

Les progrès réalisés, qui ont permis de diviser depuis 30 ans par deux le bruit et les émissions, peuvent se trouver compromis par la croissance du trafic aérien. Et on estime qu'environ 500 millions de personnes dans le monde sont aujourd'hui concernées par le bruit.

Les constructeurs travaillent tous sur les nouvelles générations d'avions, de moteurs, d'énergies embarquées, de nouvelles formes aérodynamiques et de matériaux (nanotechnologies...).

L'avion électrique court et moyen-courrier de moins de 100 places

EN RÉSUMÉ, CE QU'IL FAUT FAIRE



Sur les court et moyen termes

- Renouveler les flottes dans les compagnies aériennes, incitations par des taxes aéroports modulables, accord internationaux ;
- Interdire le transport de carburant* ;
- Rendre obligatoire les descentes continues « tout réduit » ;
- Éviter les roulages avec la poussée des réacteurs : inciter au « green taxi » ou aux tracteurs rapides pour amener l'avion à son point de décollage ;
- Compenser intelligemment les émissions par des investissements verts (plantations...) comme Air France avec l'association A tree for you ;
- Équiper d'urgence les aéroports en énergies renouvelables (et stockage) ;
- Équiper en ressources électrique renouvelables les aérodromes secondaires (500 aérodromes en France) ;
- Aider l'aviation générale et de loisir à investir dans des avions légers à très faible émissions.

* Dans certaines escales, le kérosène est moins cher, si bien que les compagnies demandent aux pilotes de transporter du carburant au retour à la base au-delà des besoins : l'avion devient une citerne volante mais, plus lourd, il « surconsomme » et émet d'autant plus.

Sur les moyen et long termes

- Précommander des avions « verts » pour accélérer la rupture technologique ;
- Augmenter les aides à la recherche par l'UE (il faut 20 milliards de dollars en recherche et développement pour une aviation décarbonée).

avec une autonomie d'environ deux heures pourrait faire son apparition dans les années 2050. Mais la marche est haute, car actuellement, pour avoir l'énergie apportée par 1 kg d'essence, il faut 30 kg de batteries ! Et l'hydrogène liquide embarqué nécessite des réservoirs capables de maintenir une température de moins 256 degrés.

Les ingénieurs travaillent aujourd'hui sur plusieurs technologies-clés, comme la génération d'énergie électrique par hybridation de batteries et de piles à combustible à hydrogène. Des études, notamment de l'ONERA, proposent des dizaines de soufflantes électriques réparties dans les bords d'attaque des ailes pour augmenter le rendement propulsif et diminuer le bruit. Des ailes à géométrie variable en fonction de la vitesse sont également à l'étude.

Les aéroports sont également concernés, car ils émettent à eux seuls le quart des gaz à effet de serre du transport aérien. Cela inclut les infrastructures techniques, les acheminements, les aéronefs, etc., ainsi que le roulage des

avions « au moteur » et les phases d'approche et de décollage.

LES INCITATIONS FINANCIÈRES

Si le transport aérien a bénéficié de détaxes sur les produits pétroliers, il semble que cette exception devienne insupportable pour une majorité de citoyens qui voient le prix à la pompe augmenter. Il va probablement être appliqué des taxes et redevances aéroportuaires en fonction des performances environnementales des avions.

LIATA, au nom de presque 300 compagnies aériennes, a annoncé viser la neutralité carbone en 2050, un programme qui devrait coûter 1 800 milliards de dollars. Mais, si nous ne faisons rien, il y aura un doublement des émissions en 30 ans.

LES BIOCARBURANTS

Ces carburants d'aviation durables (*sustainable aviation fuels* ou SAF),

élaborés à partir d'huiles usagées, de graisses animales ou bientôt de CO₂ récupéré, ont l'avantage de pouvoir être utilisés sur les moteurs actuels sans trop de modifications. C'est une solution qui permettrait à court terme de réduire les émissions de CO₂ de 80 % par rapport au kérosène. Le problème est la capacité de production, qui est actuellement de 100 millions de litres par an, alors qu'il en faudrait 450 milliards en 2050 ! Par ailleurs, le prix serait quatre à six fois plus cher que le carburant fossile. Sans oublier que ces biocarburants risquent de rentrer en compétition avec les terres agricoles.

Le challenge est de taille ! Mais les constructeurs et les compagnies qui seront vertueuses sur le marché de l'aviation verte seront bien accueillis par le public. On parle de la voiture électrique depuis 100 ans, c'est aujourd'hui une réalité. Il en sera de même pour le transport aérien. Mais c'est aujourd'hui qu'il faut agir ! ●

Vol 2050 à destination de l'émission nette zéro

Souvent pointé du doigt, le secteur aérien répond à un besoin essentiel de déplacement. Il s'engage avec détermination dans la voie de la décarbonation. Le développement des SAF en est l'axe principal. Les taxes ne sont pas une solution constructive mais le management du trafic, au travers de l'initiative ciel unique européen, doit être optimisé. La France a un rôle essentiel à jouer.

L'AÉRIEN S'ENGAGE POUR L'ÉMISSION NETTE ZÉRO DE CO₂

Malgré un contexte actuel difficile, marqué par des restrictions multiples, notamment sur la liberté de mouvement, le désir de voler et de voyager est intact. Crise ou pas crise, l'aérien se doit donc de continuer de réduire son impact environnemental. Bien que seulement responsable d'environ 2 % des émissions mondiales de CO₂, le secteur est déterminé à participer toujours plus activement à l'objectif de limiter à 1,5 °C l'augmentation de la température par rapport aux niveaux préindustriels, tel qu'il a été fixé par l'Accord de Paris sur le climat.

Engagé sur la voie de la décarbonation depuis plus d'une décennie, lors de l'assemblée générale annuelle de l'Association du transport aérien international (IATA) en octobre dernier, le secteur s'est engagé à atteindre une émission nette zéro de CO₂ d'ici à 2050. Cet objectif global constitue un défi absolument « dantesque » : 10 milliards de voyages auront lieu en 2050, l'aviation devra diminuer ses émissions de carbone de 1,8 milliard de tonnes en 2050 et, contrairement à l'automobile ou au

train, les solutions électriques ou à hydrogène ne sont toujours, dans le cas de l'aviation, qu'à l'état embryonnaire.

L'engagement FlyNetZero d'IATA est soutenu par l'ensemble du secteur de l'aviation par le biais de l'Air Transport Action Group (ATAG) qui rassemble tous les principaux acteurs du secteur (compagnies aériennes, constructeurs, motoristes, contrôle du trafic aérien, etc.).

RÉUSSITE : MODE D'EMPLOI

Si trois kilomètres de voies ferrées peuvent nous amener au village d'à côté, trois kilomètres de piste de décollage et d'atterrissage permettent, eux, de connecter une quantité presque infinie de destinations pouvant être séparées par des milliers de kilomètres ! Seule l'aviation, mode de transport le plus sûr, permet cette connexion entre personnes, sociétés, cultures et économies. Sa valeur et son apport, comme nous l'a brutalement rappelé le début de la pandémie avec le rapatriement de personnes et le transport de personnel et de matériel médical partout sur la planète, sont difficilement contestables. Mais il reste à rendre son empreinte neutre en carbone.

Car l'ennemi est bel et bien le carbone et non pas l'aviation ! Et



Rafael Schvartzman,

Vice President région Europe pour l'Association internationale du transport aérien (IATA)

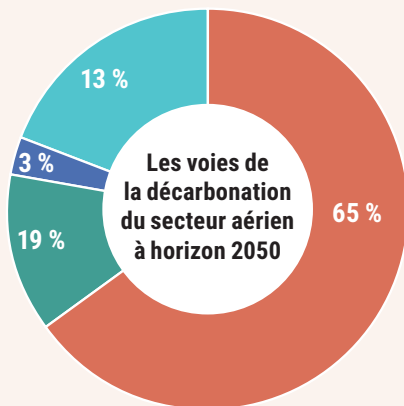
malheureusement, force est de constater que nombreux sont ceux qui confondent les deux et, bien trop souvent par opportunisme, s'attaquent par conséquent à la mauvaise cible.

Notre engagement d'octobre dernier nous oblige dès aujourd'hui à accélérer nos efforts et à travailler sans relâche pour rendre l'aviation encore plus verte. Cependant, nous, les compagnies aériennes, ne pouvons résoudre l'équation seules. Sans une collaboration constructive avec les gouvernements et autorités compétentes, nos ambitions ne pourront se matérialiser.

Les carburants d'aviation durable, plus communément connus sous leur nom anglais de *Sustainable Aviation Fuels* (SAF), forment la colonne vertébrale du plan d'émission nette zéro de CO₂ d'ici à 2050. À ce jour, des centaines

L'engagement FlyNetZero d'IATA est soutenu par l'ensemble du secteur de l'aviation par le biais de l'Air Transport Action Group





65 % d'utilisation de carburant d'aviation durable (SAF) provenant de matières premières qui ne dégradent pas l'environnement ou ne concurrencent pas la nourriture et l'eau.

19 % d'utilisation de compensations, y compris la technologie de capture et de stockage du carbone.

3 % d'amélioration continue des infrastructures et de l'efficacité opérationnelle, avec un accent particulier sur l'amélioration de la gestion du trafic aérien.

13 % d'investissements dans de nouvelles technologies aéronautiques, incluant de nouvelles solutions radicales de propulsion aérodynamique et alternatives (électriques ou hydrogène).

de milliers de vols ont lieu avec un mix de SAF, mais leur faible production et leur prix excessif (trois à cinq fois celui du kérosène ordinaire) rendent leur utilisation marginale et nécessitent un soutien franc de la part des gouvernements et des autorités compétentes. Il s'agit notamment d'améliorer la logistique, de faciliter leur financement et de mettre en place un système d'incitations afin de motiver les utilisateurs à privilégier cette solution.

Les taxes vertes ne représentent pas une alternative viable. Une taxe sur le kérosène par exemple ne rendra pas l'industrie plus verte. La grande majorité de ces taxes soi-disant « vertes » alimente le budget général des États sans aucune contribution environnementale. De surcroît, elles servent souvent à financer d'autres modes de transports déjà bien mieux dotés. Enfin, elles diminuent les moyens que l'aviation pourrait investir dans sa décarbonation.

Le cas du ciel unique européen (SES2+) dont l'adoption permettrait une réduction pouvant aller jusqu'à 10 % des émissions (source : Union européenne) est un parfait exemple. Plutôt que de céder à des excuses liées à la souveraineté et aux menaces de mouvements sociaux de parties bénéficiant d'un monopole

n'incitant nullement à l'efficacité, certains pays feraient mieux de jouer collectif et de promouvoir cette solution européenne, ne serait-ce que pour le bien de l'environnement, sans compter la réduction des retards de vols qui l'impactent fortement.

Alors qu'elle détient la présidence du Conseil de l'Union européenne et à l'aube de la Coupe du Monde de rugby de 2023 et des Jeux olympiques d'été de 2024 dont elle sera hôte et donc sous le feu des projecteurs partout dans le monde, la France peut jouer un rôle positif pour amener l'ensemble des parties à travailler ensemble, main dans la main avec notre secteur, afin de relever le défi de la décarbonation. ●

Changement climatique : quels impacts sur le transport aérien ?



Nicolas Gourdain,
enseignant-chercheur, ISAE-SUPAERO

L'atténuation de l'impact climatique de l'aviation représente un formidable enjeu mais ne constitue que l'une des facettes du défi environnemental. Le changement climatique en cours, et dont les conséquences vont s'intensifier dans les décennies à venir, nécessite de considérer une autre facette du problème : l'adaptation.

Pour définir une politique d'adaptation efficace, la priorité est d'identifier et de quantifier l'ensemble des impacts potentiels du changement climatique sur le transport aérien. Ces impacts sont principalement de deux natures : les impacts directs, dus aux modifications de l'atmosphère et des océans, et les impacts indirects, dus aux changements de comportement.

DES ENJEUX SOCIÉTAUX...

Ces évolutions peuvent être induites par des modifications d'ordre sociétal, par exemple le développement des visioconférences ou une meilleure connaissance des enjeux environnementaux, qui aboutissent à une modification de la demande (en Suède, en 2019, le nombre de passagers a baissé de 9 % sur les vols intérieurs en raison du mouvement *flygskam*). Ces changements peuvent aussi être le résultat de modifications des habitudes touristiques (en évitant des destinations touchées de manière récurrente par des épisodes météorologiques intenses). Certains pays méditerranéens (Grèce par exemple) pourraient ainsi voir la demande touristique chuter fortement, de l'ordre de 30 % durant l'été, et ce, dès la décennie 2030. Les régions fortement impactées par des canicules ou des incendies sont aussi susceptibles de subir une baisse du nombre d'habitants. C'est notamment le

cas de la Californie qui n'avait pas connu de baisse de sa population depuis plus d'un siècle. Ces changements vont nécessiter des adaptations de l'offre, différenciées suivant les régions du monde.

... ET DES CONSÉQUENCES SUR LES OPÉRATIONS AÉRIENNES

Le changement climatique va aussi avoir des impacts directs, qui peuvent se subdiviser en cinq grandes catégories, représentées sur la figure 1 : les

changements des régimes de précipitations et des régimes de vents, les changements des températures de l'atmosphère, la montée du niveau des océans et les événements extrêmes.

Baisse de la densité de l'air

Plusieurs dizaines de vols ont déjà été annulés à Phoenix (USA) en 2017, ou encore à Dallas (USA) en 2021, en raison des vagues de chaleur intenses, avec des températures au sol proches de 50 °C. Ces conditions extrêmes impactent fortement les opérations d'atterrissage et de décollage des avions, en raison de la

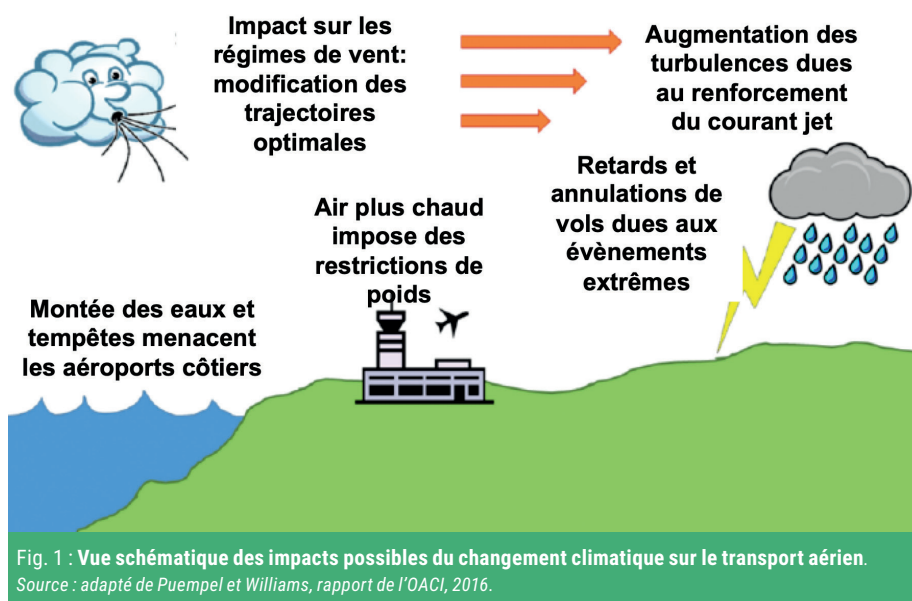




Fig.2 : Aéroport international de Osaka-Kansai (Japon) en 2018 après le passage du typhon Jebi.

© The Asahi Shimbun

diminution de la densité de l'air lorsque la température augmente. Cela se traduit par une réduction de la portance et de la poussée des moteurs, de manière sensible dès que la température au sol dépasse 35 °C. Dans ces conditions, pour une longueur de piste fixée, la masse maximale au décollage de l'avion doit être réduite, notamment en diminuant le nombre de passagers. Par exemple, à Toulouse, de telles restrictions de poids pourraient représenter environ 10 % à 20 % du nombre de sièges disponibles pour un court courrier, et s'appliquer 4 à 5 jours en moyenne chaque été à l'horizon 2050. Les aéroports situés dans les régions chaudes (bassin méditerranéen) et humides (zones tropicales) seront impactés encore plus significativement.

Des turbulences plus intenses et plus fréquentes

Le changement climatique va aussi renforcer les conditions propices à la création des turbulences en ciel clair, dont le coût actuel est déjà de plusieurs centaines de millions de dollars pour les compagnies aériennes (dégâts sur la structure de l'avion, blessures aux passagers). Le réchauffement de l'atmosphère va augmenter à la fois la probabilité d'occurrence des turbulences en

ciel clair mais aussi leur intensité. Les connaissances disponibles dans la littérature scientifique indiquent que, pour un scénario de fort réchauffement climatique (de l'ordre de 5°C), la probabilité d'occurrence des turbulences modérées à sévères va augmenter de 30 % dans le monde en moyenne durant la seconde moitié du XXI^e siècle, et même dépasser 150 % dans la région de l'Atlantique Nord (une des régions les plus fréquentées par les vols commerciaux).

Disponibilité des aéroports

D'autres conséquences du changement climatique sont aussi à attendre, notamment en raison des changements de précipitations et des risques de submersion des aéroports. Près de 1 200 aéroports dans le monde (de différentes catégories) sont situés dans une zone de faible élévation côtière, en Asie du Sud-Est, en Australie ou encore dans les régions insulaires (Indonésie et Polynésie par exemple). Parmi ces aéroports, les 20 plus gros représentent 18 % du trafic de passagers mondial, et 25 % du fret. L'adaptation de ces aéroports (digues, relocalisation), permettant de maintenir le même niveau de disponibilité qu'actuellement, est estimée à environ 50 milliards de dollars.

CONCLUSION

En conséquence, l'atténuation du changement climatique est urgente et nécessaire, mais n'est pas suffisante. Les impacts sur le transport aérien présentés dans cet article ne sont que quelques exemples des conséquences possibles du changement climatique pour le transport aérien. L'ampleur de ces phénomènes dépendra en grande partie de notre capacité collective à inscrire notre développement dans un cadre compatible avec l'Accord de Paris, la plupart de ces phénomènes demeurant gérables pour un réchauffement de l'ordre de +1,5 °C. Plus que jamais, la poursuite de travaux de recherche interdisciplinaires (climat, sciences de l'ingénieur, économie, droit), réunissant universitaires, industriels et compagnies aériennes, permettra d'améliorer les connaissances, de proposer des pistes pour mieux anticiper les impacts du changement climatique et d'en réduire les incertitudes. ●

Les effets non-CO₂ : l'autre impact climatique de l'aviation

Jérôme Fontane et Florian Simatos,
ISAE-SUPAERO

Contrairement aux idées reçues, les émissions de gaz à effet de serre du secteur aérien, désignées par effets CO₂, ne constituent qu'une part minoritaire de son impact climatique actuel. Les autres effets, dits non-CO₂, opèrent cependant sur des échelles de temps beaucoup plus courtes qui laissent entrevoir des solutions à court terme.



Trainées d'avion au-dessus de Lisbonne. © NASA-Photojournal-JPL.

EFFETS NON-CO₂

Une spécificité des avions est qu'ils perturbent l'équilibre radiatif de la Terre via diverses interactions, désignées par effets non-CO₂, entre leurs effluents moteur et l'atmosphère. Ces derniers résultent des espèces produites par la combustion du kérosène autres que le CO₂ : de la vapeur d'eau, des NOx, du monoxyde de carbone, des composés soufrés, des hydrocarbures ou encore des particules de suie. Certains effluents sont à l'origine de processus physiques et chimiques qui perturbent le climat de diverses manières. Certains effets sont réchauffants et d'autres sont refroidissants. Au total, les effets non-CO₂ sont réchauffants et contribuent pour près des deux tiers à l'impact climatique actuel du secteur aérien mesuré en forçage radiatif effectif (ERF)¹, soit 66 mW m⁻² contre 34 mW m⁻² pour les effets CO₂.

DESCRIPTION DES CINQ EFFETS NON-CO₂

Les effets non-CO₂ sont au nombre de cinq. L'effet prépondérant est celui des cirrus induits par les traînées de condensation. Sous certaines conditions atmosphériques, ces traînées blanches

que l'on observe parfois dans le sillage d'un avion peuvent persister et s'étendre pour former de longs nuages de haute altitude appelés cirrus. Ces cirrus existent à l'état naturel et l'aviation contribue donc à en créer d'autres. Ces nuages ont des effets à la fois refroidissants (augmentation de l'albédo) et réchauffants (augmentation de l'effet de serre), mais au total, c'est l'effet réchauffant qui domine. L'impact climatique de ces cirrus est aujourd'hui évalué à +57 mW m⁻².

Le deuxième effet en niveau d'intensité est causé par les NOx, qui résultent de l'oxydation de l'azote atmosphérique due à la haute température de la combustion. Ces NOx n'ont pas d'impact climatique direct, mais ils participent à des réactions chimiques qui détruisent et créent certains gaz à effet de serre (notamment destruction de méthane et création d'ozone). Au final, c'est l'effet réchauffant qui domine et l'impact des NOx est évalué à +17 mW m⁻².

Outre l'effet des cirrus induits et des NOx, les trois autres effets non-CO₂ sont :

1. L'augmentation de la concentration de la vapeur d'eau stratosphérique due aux vols ayant lieu dans la basse stratosphère. Cet effet augmente l'effet de serre et a donc un effet réchauffant évalué à +2 mW m⁻² ;

2. L'augmentation de la quantité de rayonnement solaire réfléchi par les aérosols. Cet effet augmente l'albédo terrestre et a donc un effet refroidissant évalué à -6 mW m⁻² ;

3. La modification des propriétés des nuages. Cet effet n'est pas encore bien compris, et la valeur de son impact climatique (ne serait-ce que son signe) ne fait pas aujourd'hui l'objet d'un consensus scientifique.

Ces effets non-CO₂ sont difficiles à quantifier et la valeur précise de leur impact sur l'ERF est soumise à de fortes incertitudes comme illustré sur la figure 1. Ainsi, les valeurs rapportées ci-dessus correspondent aux valeurs médianes des estimations disponibles. Par exemple, si la valeur médiane de l'impact des cirrus induits vaut 57 mW m⁻², il y a en fait 10 % de chance qu'il soit supérieur à 98 mW m⁻² ou inférieur à 17 mW m⁻². De nombreux travaux scientifiques sont actuellement en cours pour réduire ces incertitudes.

DES EFFETS DE COURT TERME

Les effets non-CO₂ sont de nature fondamentalement différente des effets CO₂. En effet, une partie du CO₂ émis

1. L'ERF (effective radiative forcing) mesure les changements sur l'équilibre radiatif du système climatique terrestre. Il est exprimé en puissance surfacique, ici en milliwatt par mètre carré.

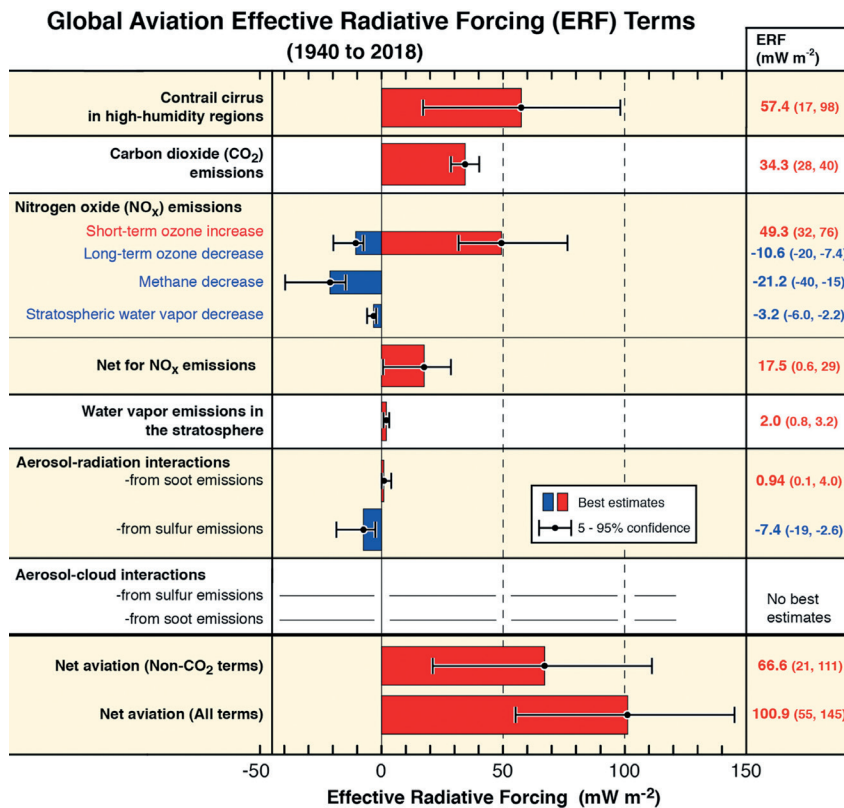


Fig. 1 : Estimation de l'impact climatique des effets CO₂ et non-CO₂ avec les barres d'incertitude. Source : Lee et al., *The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018*, *Atmospheric Environment*, 2021.

aujourd'hui va rester des millénaires dans l'atmosphère, ce qui implique que les effets CO₂ sont cumulatifs et de long terme. Les émissions actuelles de CO₂ continueront donc à avoir un impact climatique dans les siècles à venir et ce, quelles que soient les innovations technologiques et l'évolution du trafic.

À l'inverse, les effets non-CO₂ sont de court terme : les cirrus induits par les traînées de condensation persistent au plus quelques jours et les aérosols restent au plus un an dans l'atmosphère. Ainsi, si dans les années à venir des solutions technologiques réduisent les effets non-CO₂ ou si le trafic aérien diminue, alors l'impact climatique dû aux effets non-CO₂ **diminuera**. Par exemple, suite à la crise économique mondiale en 2009, le trafic aérien a diminué de 2,4 % et l'impact climatique de l'aviation a diminué de 1 %. Le fait que les effets non-CO₂ soient à la fois très puissants et de court terme explique la corrélation entre variation du trafic et variation de l'impact climatique. Cette corrélation, très claire sur la figure 2, va dans les deux sens : par exemple, en 2004, le trafic a augmenté de 13 % et l'impact climatique de l'aviation de 8 %. La figure 2 montre bien qu'il s'agit d'une spécificité liée aux effets non-CO₂, puisque la courbe jaune qui montre la variation de l'impact

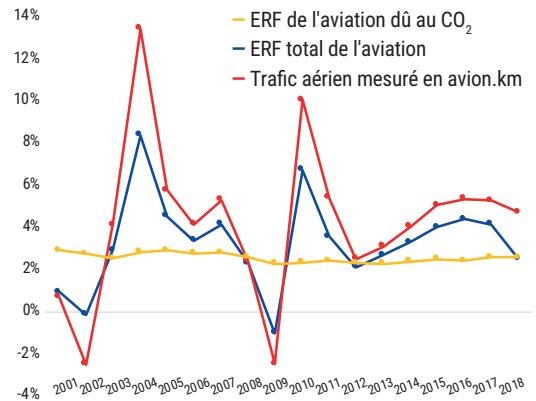
climatique lié aux seuls effets CO₂ est quant à elle très stable, reflétant leur caractère cumulatif plutôt que de court terme.

LEVIERS D'ATTÉNUATION ENVISAGEABLES

Deux leviers sont aujourd'hui envisagés à court terme pour diminuer les effets non-CO₂. Le plus prometteur consiste à prédire la formation des cirrus induits par les traînées et à modifier la trajectoire d'un avion qui engendrerait de tels cirrus. Cette stratégie est particulièrement prometteuse car seule une petite fraction des vols est responsable d'une majorité de l'impact climatique des cirrus induits. Une étude dans l'espace aérien japonais estime ainsi que 2 % des vols sont responsables de 80 % de l'impact climatique des cirrus. Néanmoins, il n'y a pas encore de consensus scientifique quant au degré de maturité de cette solution. En effet, le changement de trajectoire induit une surconsommation de carburant et donc des émissions de CO₂ supplémentaires. Il faut donc être en mesure de prédire avec confiance la formation de cirrus sous peine d'augmenter les émissions de CO₂ sans contrepartie.

Le deuxième levier envisagé est lié

Fig. 2 : Chaque courbe représente le taux de variation annuel d'une quantité distincte. Source : Référentiel ISAE-SUPAERO Aviation et Climat, figure 2.8.



aux biocarburants qui sont des carburants de synthèse produits à partir de biomasse. Ils ont une composition chimique très proche de celle du kérosène d'origine fossile, mais ils possèdent moins de composés aromatiques. Or, ces aromatiques sont des précurseurs de la suie qui favorise la formation des traînées de condensation. Les chiffres nécessitent encore d'être confirmés par des études scientifiques mais on estime aujourd'hui que l'utilisation de biocarburants à des taux d'incorporation de 50 % pourrait diminuer l'impact climatique de l'aviation de l'ordre de 10 à 25 %.

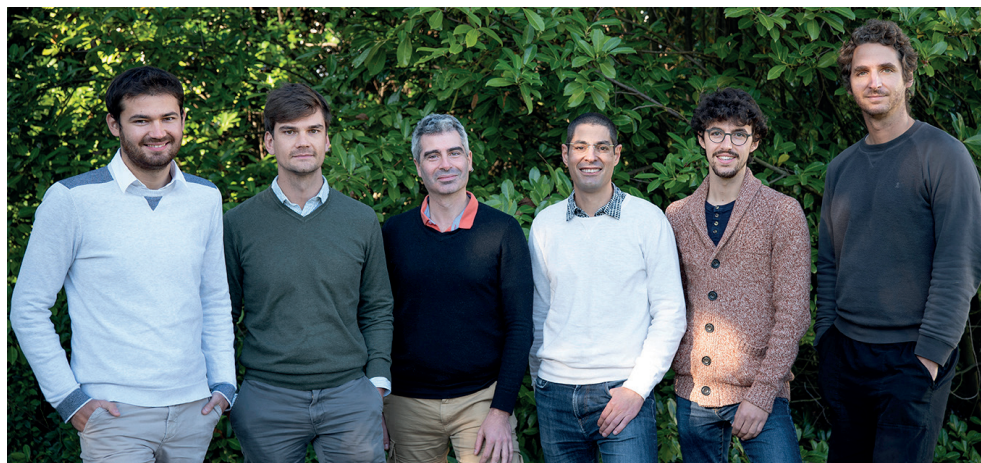
CONCLUSION

À mesure que les effets non-CO₂ sont mieux connus, ils gagnent de plus en plus d'importance dans les débats publics et les stratégies industrielles. Il est envisageable que, dans les années à venir, des stratégies efficaces d'atténuation de ces effets soient disponibles, ce qui permettrait de diminuer de manière très significative l'impact climatique de l'aviation. Néanmoins, à cause de leur nature fondamentalement différente des effets CO₂, ces efforts d'atténuation doivent se faire en parallèle d'efforts de diminution des émissions de CO₂. En effet, les deux ne sont pas substituables et la diminution des effets non-CO₂ n'exonère pas de diminuer les émissions de CO₂ qui, de par leur nature cumulative, accroissent à long terme le réchauffement climatique. ●

Pourra-t-on concilier décarbonation et croissance du trafic aérien ?

Un ensemble d'innovations technologiques et énergétiques permettent d'envisager un avion bas carbone dans les décennies à venir. Ces innovations devront se déployer dans l'ensemble de la flotte pour réduire significativement les émissions du secteur aérien. Cette stratégie sera-t-elle à la hauteur des enjeux climatiques ? Une méthodologie et des analyses de scénarios de transition pour le secteur sont présentées pour répondre à cette question.

**Scott Delbecq,
Jérôme Fontane,
Nicolas Gourdain,
Hugo Mugnier, Thomas
Planès, Florian Simatos,**
ISAE-SUPAERO



ÉVALUATION DE LA DURABILITÉ D'UN SCÉNARIO DE TRANSITION CLIMATIQUE

Avant de présenter des scénarios de transition pour le secteur aérien, il est nécessaire de définir une démarche scientifique permettant de mesurer leur durabilité d'un point de vue climatique. Les analyses se focalisent ici sur les émissions de CO₂ du secteur aérien et n'intègrent pas les effets non-CO₂ tels que les cirrus induits par les traînées de condensation.

Accord de Paris et notion de budget carbone

L'Accord de Paris vise à maintenir l'élévation de la température moyenne de la planète en 2100 nettement en dessous de +2 °C par rapport aux niveaux préindustriels et à poursuivre l'action menée pour limiter l'élévation de température à +1,5 °C. Les travaux du GIEC ont montré que cela implique une réduction significative des émissions de gaz à effet de serre, notamment de CO₂.

Dans ce contexte, la notion de budget carbone est couramment utilisée pour évaluer les stratégies d'atténuation. Le budget carbone représente la quantité

cumulée maximale nette de CO₂ que l'Humanité peut émettre tout en limitant le réchauffement climatique sous une température cible. Sa valeur dépend de l'objectif climatique et de l'incertitude considérée : ainsi, le GIEC a évalué à 400 GtCO₂ le budget carbone restant pour limiter le réchauffement à +1,5 °C (ce qui représente 10 ans d'émissions au rythme actuel) et à 1 400 GtCO₂ le budget carbone à +2 °C. Il s'agit de valeurs médianes qui permettent d'atteindre, en l'état des connaissances scientifiques, l'objectif climatique fixé avec une probabilité de 50 %. Par ailleurs, il s'agit de budgets nets. Ainsi, le budget carbone à +1,5 °C peut être respecté en émettant 400 GtCO₂ et sans rien retirer de l'atmosphère, ou bien en émettant (par exemple) 1 000 GtCO₂ tout en développant des technologies à émissions négatives (afforestation, capture directe de carbone...) aptes à retirer 600 GtCO₂ de l'atmosphère.

Budget carbone pour le secteur aérien

Une fois ce budget carbone défini, il est nécessaire d'en allouer une part pour le secteur aérien. Le choix de cette allocation est d'ordre politique et basé sur des considérations d'ordre économique, social ou technologique. Dans les analyses qui suivent, la part



allouée au secteur aérien est donc considérée comme une variable dont l'influence sur les émissions de CO₂ est analysée en la faisant varier.

Nous faisons varier cette part autour d'une valeur de référence de 2,6 %. Cette valeur correspond à la part de l'aviation commerciale dans les émissions mondiales de CO₂ en 2018. Si ce choix était effectué pour chaque secteur d'activité, i.e. si chaque secteur avait une part du budget carbone égale à sa part actuelle des émissions, alors cela correspondrait à une approche indifférenciée où tous les secteurs d'activité réduiraient leurs émissions au même taux annuel à partir d'aujourd'hui.

Allouer 2,6 % au secteur aérien revient donc à lui imposer de réduire ses émissions à la vitesse moyenne. Une allocation inférieure ou supérieure peut aussi être considérée, sachant que l'attribution d'une part plus grande à l'aviation nécessite mécaniquement que

d'autres secteurs d'activité réduisent leurs émissions plus vite que la moyenne. Le tableau 1 récapitule les arguments qui reviennent régulièrement dans le débat public pour discuter de cette allocation.

ANALYSE DE SCÉNARIOS DURABLES POUR L'AVIATION

Notre analyse de scénarios de transition du secteur aérien repose sur des hypothèses technologiques et opérationnelles. Une fois ces hypothèses faites, nous analysons alors l'influence des deux variables restantes, à savoir la part du budget carbone allouée au secteur aérien et l'évolution du trafic.

Scénarios technologiques et opérationnels

La définition des hypothèses technologiques et opérationnelles concerne à la fois l'amélioration de l'efficacité des avions (moteurs, aérodynamique, taux de remplissage, opérations...) et la décarbonation du carburant (bio- et électro-carburants, hydrogène). Compte-tenu de la littérature scientifique, il est raisonnable de considérer que l'utilisation de carburants alternatifs permet de réduire les émissions de 75 % sur l'ensemble du cycle de vie par rapport au kérosène. Deux scénarios illustratifs sont considérés et décrits dans le tableau 2.

Ces scénarios mènent à des facteurs d'émission de 89 et 17 gCO₂/passager.km en 2050, à comparer à la valeur actuelle du facteur d'émission de la flotte aux alentours de 130 gCO₂/passager.km, quand les meilleurs avions actuels ont un facteur d'émission inférieur à 100 gCO₂/passager.km. Même si des scénarios encore plus optimistes ou pessimistes ne peuvent pas être écartés, ces scénarios constituent une enveloppe vraisemblable des trajectoires technologiques futures.

...

Tableau 1 : Arguments concernant la part du budget carbone mondial à allouer au secteur aérien.

Allocation supérieure à 2,6 %	Allocation inférieure à 2,6 %
• Secteur parmi les plus difficiles à décarboner technologiquement, dit <i>hard-to-abate</i>. • D'autres secteurs offriront des marges de manœuvre supplémentaires en raison de leur capacité à se décarboner (voire à stocker du carbone) à moindre coût ou plus rapidement. • Secteur vital pour l'économie.	• Secteur non essentiel par rapport aux besoins primaires. • L'approche différenciée du protocole de Kyoto exige plus de réduction de la part des secteurs avec une plus grande intensité des émissions. • Ne pas récompenser les plus gros pollueurs.

Tableau 2 : Scénarios illustratifs considérés

Scénario	Tendanciel	Ambitieux
Efficacité énergétique	Évolution tendancielle des technologies et du remplissage	Accélération des innovations technologiques, du taux de remplissage et des opérations
Décarbonation du carburant en 2050	Aucune	L'ensemble de la flotte utilise des carburants alternatifs bas carbone
Facteur d'émission en 2050	89 gCO ₂ /passager.km	17 gCO ₂ /passager.km

Arbitrage entre niveau de trafic et part du budget carbone

Une fois les hypothèses technologiques et opérationnelles définies, une analyse paramétrique est conduite en faisant varier la part du budget carbone allouée à l'aviation. Pour chaque part, le taux de croissance annuel du trafic est alors ajusté afin que les émissions cumulées de la trajectoire soient égales au budget carbone alloué à l'aviation. Ainsi, le taux de croissance obtenu constitue le taux de croissance durable maximal.

La figure 1 représente les taux de croissance durable du trafic aérien pour différentes allocations en considérant les budgets carbone pour +1,5 °C (enveloppe verte) et +2 °C (enveloppe rouge). Pour chaque enveloppe, la courbe supérieure correspond au scénario ambitieux et la courbe inférieure au scénario tendanciel. La ligne verticale en pointillé correspond à l'allocation de référence de 2,6 % et la ligne horizontale en pointillé représente les prévisions industrielles de croissance annuelle du trafic aérien estimée à 3 %.

Pour limiter le réchauffement à +1,5 °C, une allocation de 2,6 % du budget carbone mondial au secteur aérien implique une forte décroissance du trafic quel que soit le scénario. Pour atteindre le taux de croissance tendanciel du trafic aérien de 3 %, il est nécessaire d'allouer au secteur aérien 6 % du budget carbone mondial dans le cas du scénario ambitieux.

Pour limiter le réchauffement à +2 °C, les résultats sont plus nuancés : le scénario tendanciel nécessite une baisse annuelle du trafic aérien de 1,8 % quand le scénario optimiste permet une croissance annuelle de 2,9 % dans le cas d'une allocation de référence de 2,6 %.

Ainsi, la technologie seule ne permettra pas à l'aviation de baisser les émissions à la vitesse moyenne requise pour respecter l'objectif climatique le plus ambitieux si le trafic aérien croît au rythme prévu par les industriels. Ce constat implique la nécessité d'un arbitrage politique entre l'évolution du trafic aérien et le budget carbone alloué au secteur aérien.

CONCLUSION ET OUVERTURE SUR LES ENJEUX ÉNERGÉTIQUES

Si le niveau des émissions de CO₂ en 2050 est souvent considéré comme une métrique pour évaluer la durabilité d'un scénario de transition du secteur aérien, d'un point de vue climatique ce sont bien les émissions cumulées de la trajectoire qui comptent. Les solutions technologiques permettront de diminuer les émissions par passager-kilomètre via le déploiement d'avions bas carbone. Néanmoins, **si le trafic évolue selon les prévisions industrielles**, alors ces solutions technologiques ne permettront pas de réduire les émissions du secteur suffisamment vite pour être compatible avec les objectifs climatiques de l'Accord de Paris **dans le cadre d'une approche où chaque secteur réduirait ses émissions à la vitesse moyenne requise**. La durabilité d'un scénario de transition du secteur aérien reposera donc sur un arbitrage politique entre l'objectif climatique, l'évolution du trafic et la part du budget carbone qui lui sera allouée.

Au-delà des enjeux climatiques, il est également nécessaire de considérer la disponibilité des ressources énergétiques bas carbone pour réussir la transition du secteur. Au contraire du kérosène, les carburants alternatifs envisagés sont des vecteurs énergétiques qui doivent d'abord être produits à partir d'autres sources d'énergie primaire. Cette phase de production induit des pertes de rendement potentiellement importantes. Par ailleurs, le besoin en énergie embarquée augmentera si le trafic croît plus vite que les gains d'efficacité. Ainsi, en cas de forte hausse du trafic, l'aviation aura besoin d'une quantité d'énergie primaire (principalement biomasse et électricité) plus importante qu'aujourd'hui, comme illustré schématiquement sur la figure 2.

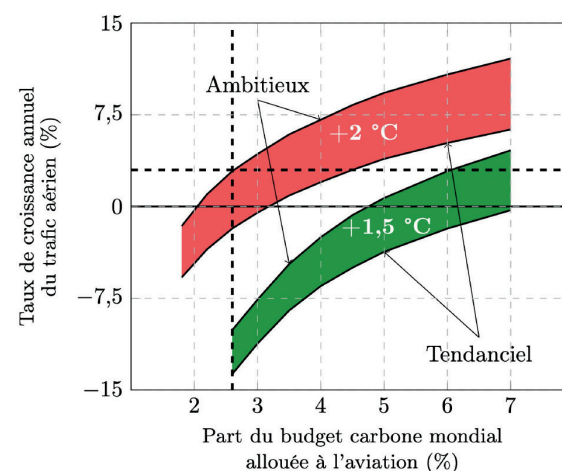


Fig. 1 : Taux de croissance annuel durable du trafic aérien en fonction de la part du budget carbone allouée à l'aviation.

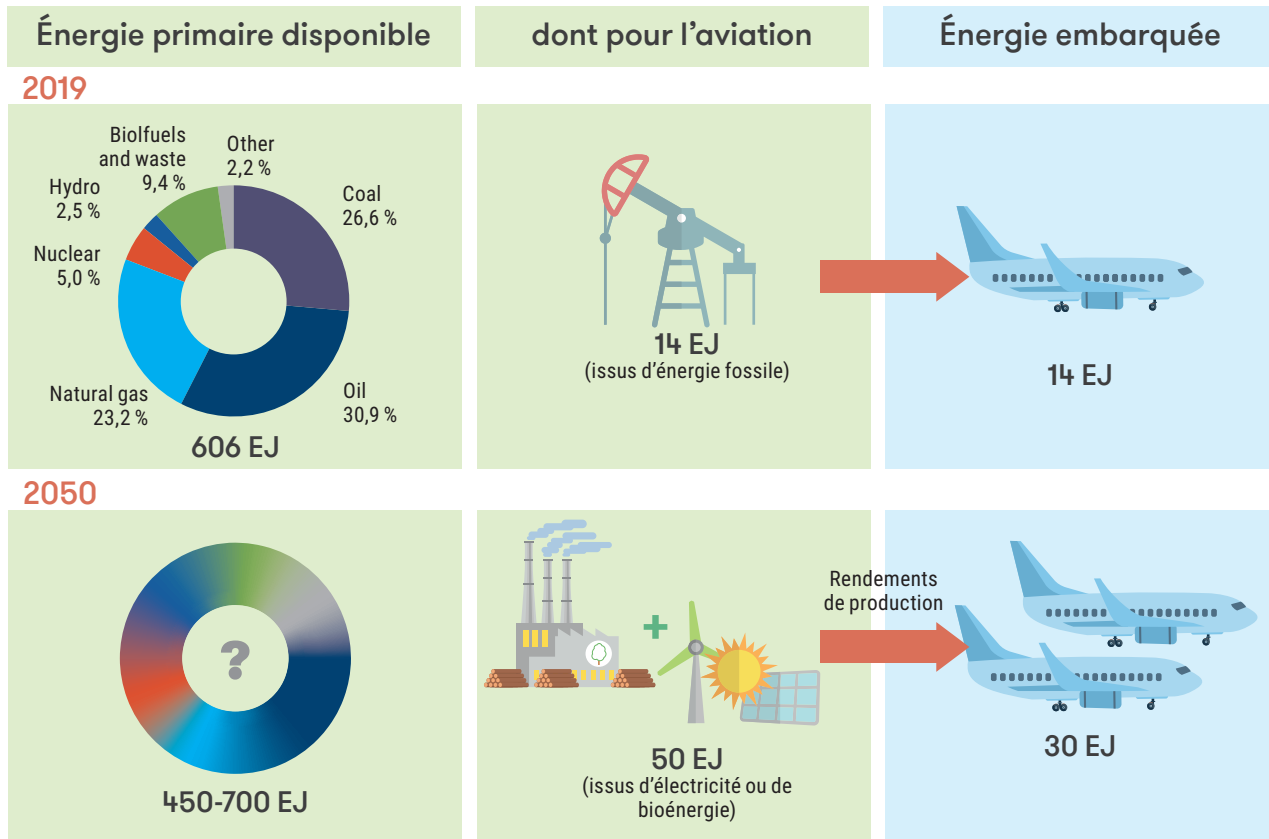


Fig. 2 : Évolution schématique de la part d'énergie primaire nécessaire pour l'aviation.

Les chiffres pour 2050 sont à titre illustratif (la quantité d'énergie embarquée dépend de l'efficacité énergétique des futurs avions et les rendements des voies de production dépendent des voies de production utilisées). La plage de valeurs indiquées pour l'énergie primaire est issue des scénarios de prospective énergétique du GIEC, de l'AIE et de l'IRENA disponibles à ce jour.

Déterminer la disponibilité future de ces ressources énergétiques est un exercice complexe. Concernant la biomasse, le gisement est limité et ne permettra a priori pas aux biocarburants de répondre à eux seuls à l'ensemble des besoins du secteur aérien. Quant à l'électricité, qui peut être utilisée pour produire des électrocarburants ou de l'hydrogène, le gisement potentiel est beaucoup plus grand, mais son exploitation est limitée par plusieurs facteurs socio-économiques et techniques dont notamment la vitesse de déploiement des installations de production électrique. Ainsi, à horizon 2050, les scénarios de prospective énergétique disponibles aujourd'hui et compatibles avec une limitation du réchauffement climatique tablent sur un potentiel de biomasse de l'ordre de 100 EJ et sur une augmentation de l'électricité produite, pouvant aller jusqu'au triple de la valeur actuelle dans les scénarios les plus ambitieux soit environ 300 EJ. Dans la plupart de ces scénarios, l'énergie primaire mondiale reste en 2050 du même ordre de grandeur qu'aujourd'hui, mais un déploiement plus massif de la production électrique reste envisageable.

Dans ce contexte, le secteur aérien aurait alors besoin d'une quantité d'énergie primaire plus importante qu'actuellement, mais aussi d'une part de l'énergie primaire plus importante. Le raisonnement qui mène à cette hausse des besoins s'applique plus généralement aux secteurs d'activité difficiles

à décarboner comme les industries lourdes. D'un autre côté, on peut anticiper une baisse des besoins en énergie primaire d'autres secteurs d'activité dont l'efficacité pourrait grandement augmenter comme le bâtiment. En dernière instance, une analyse intersectorielle est donc nécessaire pour évaluer si cette hausse des besoins énergétiques de l'aviation pourra être satisfaite. ●



Si vous souhaitez approfondir cette thématique, vous pouvez consulter le Référentiel ISAE-SUPAERO Aviation et Climat.

Le règlement ReFuelEU : comment déployer les carburants durables dans le secteur aérien ?

Les carburants durables pour l'aviation, en anglais les SAF (*Sustainable Aviation fuels*) sont la solution la plus efficace et la plus mature pour réduire à grande échelle les émissions du secteur aérien. Mais les SAF ne représentent aujourd'hui qu'une fraction infime des besoins de l'aviation. La Commission européenne, au travers du projet RefuelEu, a décidé de donner une forte impulsion à leur développement.



Cecil Coulet,
Équilibre des Énergies

Le projet de règlement ReFuelEU - Aviation, de son nom officiel « Règlement relatif à l'instauration d'une égalité des conditions de concurrence pour un secteur du transport aérien durable », a été publié le 14 juillet 2021, dans le cadre du paquet législatif européen *Fit for 55*.

Le but de ce règlement est de mettre en place les conditions nécessaires au déploiement des carburants durables d'aviation, les SAF (*sustainable aviation fuels*). La pénétration des SAF sur le marché étant actuellement très faible, notamment du fait de coûts élevés et d'une disponibilité insuffisante, des mesures d'accélération de leur déploiement sont nécessaires pour inciter et soutenir les différents acteurs de la filière dans leur transition vers ces carburants durables.

Définition des termes clés

L'article 3 présente les définitions des termes clés, en particulier celles des SAF et des carburants de synthèse. Les SAF sont soit des carburants de synthèse, soit des biocarburants avancés au sens de la directive RED¹, soit des biocarburants produits à partir des huiles de cuisson usagées et des graisses animales de catégories 1 et 2².

Les carburants de synthèse ou e-carburants sont des carburants renouvelables d'origine non biologique. Leur fabrication fait appel à l'hydrogène et à l'électricité bas carbone ainsi qu'à du CO₂ récupéré dans l'atmosphère.

Obligations imposées aux fournisseurs de carburants durables

L'article 4 met en place un système obligatoire d'intégration minimal de carburants durables dans les carburants livrés à l'aviation. Ces valeurs minimales, qui doivent être respectées par chaque aéroport européen où transitent plus d'un million de passagers par an, sont, selon le projet proposé, les suivantes :

À partir du 1 ^{er} janvier...	
2025	2 %
2030	5 % dont au moins 0,7 % de carburants de synthèse
2035	20 % dont au moins 5 % de carburants de synthèse
2040	32 % dont au moins 8 % de carburants de synthèse
2045	38 % dont au moins 11 % de carburants de synthèse
2050	63 % dont au moins 28 % de carburants de synthèse

Si un fournisseur ne respecte pas les quotas requis pour une période donnée, la part manquante de SAF à fournir est reportée sur la période suivante, sans préjudice des sanctions administratives que les États sont tenus d'instaurer.

Selon l'article 4, la fourniture de ces quotas et sous-quotas doit s'effectuer auprès de chaque aéroport européen. Jusqu'à la fin de 2029, une moyenne pondérée des livraisons effectuées dans

les différents aéroports européens est possible.

Obligations imposées aux compagnies aériennes

L'article 5 stipule que les compagnies aériennes devront effectuer 90 % de leur approvisionnement dans les aéroports européens, c'est-à-dire les aéroports approvisionnés en SAF au titre de l'article précédent. Aucune dérogation n'est prévue et cette disposition entrerait donc en vigueur en même temps que le règlement.

Obligations imposées aux aéroports européens

L'article 6 indique que les aéroports doivent prendre les mesures nécessaires pour faciliter l'accès des compagnies aériennes aux SAF et offrir l'infrastructure nécessaire.

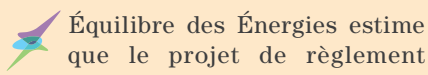
Sanctions prévues

L'article 10 impose aux États membres de mettre en place une ou des autorités compétentes pour veiller au respect du règlement et pour distribuer les pénalités aux acteurs de l'aérien, compagnies aériennes, fournisseurs de carburants et aéroports, qui ne respectent pas leurs obligations.

L'article 11 précise les pénalités auxquelles s'exposent les acteurs en cas de non-respect de leurs obligations. ●

1. Les biocarburants avancés utilisent une matière végétale, dite « lignocellulosique », différente des biocarburants conventionnels : résidus agricoles, déchets forestiers, cultures dédiées comme le miscanthus.

2. Les graisses animales de catégories 1 et 2 sont récupérées sur les animaux trouvés morts ou envoyés à l'équarrissage. Les graisses de catégorie 3 proviennent d'animaux dont les carcasses ont été déclarées propres à la consommation humaine ou animale.



Équilibre des Énergies estime que le projet de règlement ReFuelEU - Aviation publié par la Commission européenne va dans le bon sens. Au vu du faible niveau actuel de production et de consommation de carburants durables d'aviation, la mise en place de mesures d'accompagnement et d'accélération de leur déploiement est essentielle. Plusieurs points nécessitent cependant examen.

Les ressources européennes en huiles de cuisson usagées et graisses animales ne sont pas compatibles avec les objectifs de déploiement des SAF. Équilibre des Énergies recommande d'examiner la possibilité d'élargir la liste des matières premières autorisées, sans toutefois recourir aux matières premières issues des cultures vivrières ou agricoles. Équilibre des Énergies recommande également de permettre l'utilisation de l'hydrogène et de l'électricité bas carbone dans la production des carburants de synthèse, là où le texte propose de n'autoriser que l'hydrogène et l'électricité renouvelables.

Équilibre des Énergies recommande de mettre en place un système de certificats et de *book and claim* par lequel, dans chaque aéroport, les compagnies aériennes seraient en mesure d'acheter des certificats SAF, indépendamment de la disponibilité effective de SAF dans l'aéroport où elles s'approvisionnent. Ce système permettrait une plus grande flexibilité dans la distribution des SAF et la limitation des effets de distorsion de concurrence entre compagnies aériennes européennes et étrangères en modulant les tronçons des vols effectués par les compagnies aériennes européennes qui seront soumis à l'obligation d'incorporation de SAF.

Afin de préserver la compétitivité du secteur aérien européen, les obligations en matière de déploiement des biocarburants avancés et des carburants de synthèse doivent être complétées par des incitations financières. En particulier, les recettes issues de la mise aux enchères des quotas carbone du secteur aérien devraient, au moins en partie, être dirigées vers l'investissement dans le développement et le déploiement des SAF.

Climat-résilience : la contribution de l'aérien à la décarbonation

La promulgation des 290 articles de la loi du 22 août 2021, portant lutte contre le dérèglement climatique et renforcement de la résilience face à ses effets, a refermé la séquence de la Convention citoyenne pour le climat.



Loi climat-résilience
du 22 août 2021

En choisissant un titre de chapitre sans équivoque : « Limiter les effets néfastes du secteur aérien », la Convention citoyenne pour le climat avait à cœur de faire davantage contribuer le secteur aérien à la lutte contre le réchauffement climatique, avec à la clef sept propositions.

La loi climat-résilience, dont l'objectif était de proposer des mesures supplémentaires pour réduire les émissions de gaz à effet de serre de 40 % d'ici 2030, reprend plusieurs de ces propositions dans cinq articles :

- l'article 142 énonce l'objectif que doit se donner l'État de « voir le transport aérien s'acquitter d'un prix du carbone suffisant à partir de 2025, en privilégiant une action au niveau européen » ;
- l'article 144 vise à lutter contre la vente à perte de billets d'avion, notamment par une évolution de la réglementation européenne permettant d'instaurer un prix minimal des billets.

Les formulations choisies pour ces deux articles par les parlementaires ont pour objectif de mettre en avant ces dossiers, qui pourraient s'avérer épineux, au centre des priorités de la présidence française au Conseil de l'Union européenne (PFUE).

L'article 147 impose la compensation des émissions de gaz à effet de serre par les compagnies aériennes. Dès 2024, elles devront compenser la totalité de leurs émissions.



Olivier Lagrange,
Équilibre des Énergies

De plus, la loi énonce des restrictions pour :

- le transport aérien en interdisant le transport public de passagers « pour toutes les liaisons aériennes à l'intérieur du territoire français dont le trajet est également assuré sur le réseau ferré national sans correspondance et par plusieurs liaisons quotidiennes d'une durée inférieure à deux heures trente ». Dans la version des conventionnaires, cette durée était de quatre heures. Le transport décarboné n'est pas concerné par ces restrictions (article 145) ;
- la création et l'extension d'aéroports qui ont pour effet d'entraîner une « augmentation nette, après compensation, des émissions de gaz à effet de serre générées par l'activité aéroportuaire par rapport à l'année 2019 » (article 146). ●



Le secteur aérien n'échappe pas à la nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre et, à ce titre, Équilibre des Énergies recommande de prendre des mesures pour accélérer le déploiement des carburants aériens durables. Équilibre des Énergies estime en revanche que les mesures restrictives de la loi climat-résilience risquent de nuire à l'innovation et à la compétitivité d'un secteur essentiel à l'économie française, sans pour autant faciliter sa transition vers des énergies décarbonées.



Les enjeux des systèmes EU-ETS et CORSIA

Le système européen des quotas carbone, l'EU-ETS et le système international de compensation des émissions, le CORSIA (*Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation*) sont deux mécanismes visant à accélérer la transition du secteur aérien vers la neutralité carbone.

L'un s'applique aux vols intra-européens, l'autre à la majorité des vols extra-communautaires. Les finalités sont les mêmes mais les principes sont différents et les ambitions ne sont pas concordantes. Celles du CORSIA sont considérées comme moins prégnantes pour les compagnies aériennes que celles de l'EU-ETS. Les compagnies aériennes européennes peuvent s'en trouver pénalisées par rapport à leurs concurrentes internationales.

L'EU-ETS

Le transport aérien participe à l'EU-ETS depuis 2012 pour les émissions relatives aux vols intra-européens. Ce périmètre recouvre tous les vols domestiques et internationaux à l'intérieur d'une zone comprenant l'espace économique européen et la Suisse.

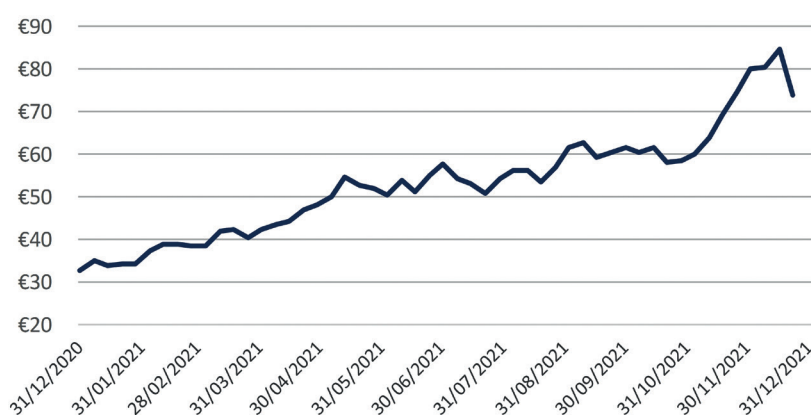
Le secteur aérien dispose d'un nombre de quotas spécifiques calculé sur la base de 95 % de ses émissions de 2005. Parmi ces quotas, 82 % sont actuellement distribués gratuitement, 3 % sont réservés à des acteurs en forte croissance et 15 % sont mis aux enchères. Le volume de quotas gratuits ainsi calculé est

réparti entre les acteurs au prorata de leur activité en 2010. Les compagnies aériennes disposent donc d'un nombre fixe de quotas gratuits et doivent acheter aux enchères ou sur le marché de l'ETS, des quotas supplémentaires pour couvrir l'ensemble de leurs émissions. En moyenne, en 2019, les quotas gratuits ont couvert 44 % des émissions du transport aérien, le solde devant être acquis par les compagnies.



François Delabre,
directeur délégué Affaires
Institutionnelles -
Air France-KLM

Fig. 1 : Évolution des prix des quotas carbone sur les marchés de l'EU-ETS. Source : Données ICE.



La révision de l'ETS proposée pour l'aviation dans le cadre du paquet *Fit for 55* est censée répondre au renforcement des ambitions environnementales européennes. La principale mesure envisagée doit conduire à réduire la part des quotas gratuits de l'aviation de 82 % à 0 % entre 2023 et 2027. Dès 2027, l'ensemble des émissions relatives aux vols intra-européens devrait ainsi être couvert par des quotas que les compagnies devront acheter aux enchères ou sur le marché de l'ETS des installations fixes.

Le prix de ces quotas a augmenté considérablement au cours des derniers mois puisqu'il a dépassé 80 €/t en décembre 2021 (*figure 1*). Sur la base des émissions de 2019, et avec une hypothèse indicative de prix du quota d'environ 100 €/t, l'achat de ces quotas représentera un coût considérable de près de sept milliards d'euros par an pour l'ensemble du secteur du transport aérien européen.

LE CORSIA

Les vols internationaux entre l'Europe et le reste du monde ne sont pas soumis à l'ETS. Ils sont couverts par le mécanisme international CORSIA (*Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation*) dont la mise en place a été décidée en octobre 2016 par l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI) dans le cadre des Nations unies.

Ce programme est un programme de compensation carbone qui impose aux États participants de veiller collectivement au plafonnement des émissions du secteur aérien en imposant aux compagnies aériennes de compenser la partie de leurs émissions excédant la moyenne des années 2019 et 2020 au travers de projets de compensation internationaux certifiés.

Le CORSIA comporte trois étapes de mise en œuvre :

- à partir de 2019, tous les opérateurs dépassant 10 000 t CO₂/an sur les vols internationaux doivent rendre compte de leurs émissions sur la base des consommations réelles de leur flotte ;
- de 2021 à 2026, les vols entre États volontaires sont soumis à compensation carbone ;
- de 2027 à 2035, tous les vols entre États membres de l'OACI sont soumis à compensation. Cependant, des exemptions sont prévues pour raisons socio-économiques ou de faible activité.

Fig. 2 : Évolution des cours des crédits carbone CORSIA. Source : Platts.



Aujourd'hui, les pays engagés de manière volontaire dans le dispositif de compensation représentent 77 % du trafic international. Ce taux de participation augmentera à plus de 90 % en 2027, lorsque tous les membres de l'OACI deviendront, sauf exemption, assujettis à la compensation. Il est estimé qu'en 2030, le CORSIA couvrira de 50 % à 70 % des émissions totales du secteur aérien, en rappelant que les vols intérieurs aux États participants n'y sont pas assujettis mais, pour l'Europe, relèvent de l'EU-ETS.

Pour l'application du CORSIA, ont été définies des règles d'éligibilité des

carburants de substitution pouvant être pris en considération dans le décompte des émissions ainsi que des critères de validité des crédits carbone pouvant venir en compensation. La COP 26 à Glasgow a permis de convenir de règles précises sur la prise en compte des crédits carbone dans les mécanismes internationaux afin notamment d'éviter les doubles comptes entre vendeurs et acheteurs de ces crédits. La perspective de ces accords et leur signature a conduit à faire remonter le cours des crédits éligibles au CORSIA mais ceux-ci restent très inférieurs à celui des quotas EU-ETS (*figure 2*). ●



Le mécanisme du CORSIA est amené à coexister avec celui de l'EU-ETS mais il est clairement moins ambitieux que ce dernier dans la mesure où il vise simplement la stabilisation des émissions. Par ailleurs, les règles d'éligibilité des carburants de substitution et des crédits carbone sont moins exigeantes que celles de l'EU-ETS.

Cependant, le CORSIA est la preuve qu'une approche multilatérale à l'échelle mondiale est possible pour décarboner le secteur aérien. Il est souhaitable que le rôle de l'OACI dans la réduction des émissions de l'aviation soit renforcé, par exemple en installant au niveau international des objectifs et une trajectoire commune d'incorporation de carburants alternatifs durables.

Il faut aussi veiller à ce que la volonté de l'Europe de montrer la voie n'agisse pas au détriment des acteurs européens et au bénéfice direct de leurs concurrents extra-communautaires. Il y a en effet un risque que l'ambition européenne conduise à des reports d'activité des compagnies européennes vers leurs concurrentes, sans gain pour le climat à l'échelle mondiale. Un passager qui choisit une compagnie européenne pour voyager vers l'Asie sera acheminé vers le hub européen de cette compagnie au travers d'un vol soumis à l'ETS. S'il choisit une compagnie extra-communautaire, il sera acheminé vers le hub de cette dernière sur un vol qui n'est pas soumis à l'ETS mais à CORSIA avec des exigences moindres. Dans l'état actuel des choses, l'ETS et CORSIA peuvent être des facteurs de distorsion de concurrence et de fuite carbone.

Il est essentiel que la Commission et les États membres renforcent les propositions actuelles de *Fit for 55* par des dispositifs visant à réduire ou éliminer ces risques. En parallèle, la voie multilatérale dans le cadre de l'OACI doit être poursuivie et réaffirmée et les États européens peuvent œuvrer au renforcement du rôle de l'OACI dans la trajectoire mondiale de décarbonation du secteur.

Le ciel unique européen : un potentiel de réduction des émissions de 10 %

La circulation aérienne est une composante clé de la décarbonation de l'aviation

La gestion de la circulation aérienne contribue fortement à la performance environnementale de l'aviation européenne. Plus un avion vole près de sa trajectoire optimale, moins il consomme de carburant et moins il émet de CO₂. Inversement, plus l'espace aérien approche de la congestion, comme en 2018 et 2019, moins les trajectoires sont efficaces. On estime qu'il reste un potentiel d'amélioration de l'ordre de 10 % pour les trajectoires aériennes en Europe. Le dispositif « ciel unique européen » vise à relever ce défi, en associant étroitement la Commission européenne comme décideur et EUROCONTROL comme bras opérationnel et technique.

Avant 2004, les fondations sont bâties par EUROCONTROL

EUROCONTROL est fondé en 1960 pour optimiser l'efficacité de la circulation aérienne en Europe. Une coopération civile et militaire rassemblant tous les États européens, un plan directeur commun de modernisation, un centre de recherche et de simulation de haut niveau, un système de redevances de route performant, une gestion centralisée des



Philippe Merlo,
directeur Aviation civile-
militaire européenne,
EUROCONTROL

flux de trafic aérien (CFMU), un système d'évaluation des performances (PRU), tels étaient les fondements posés par EUROCONTROL, à l'aube du ciel unique européen.

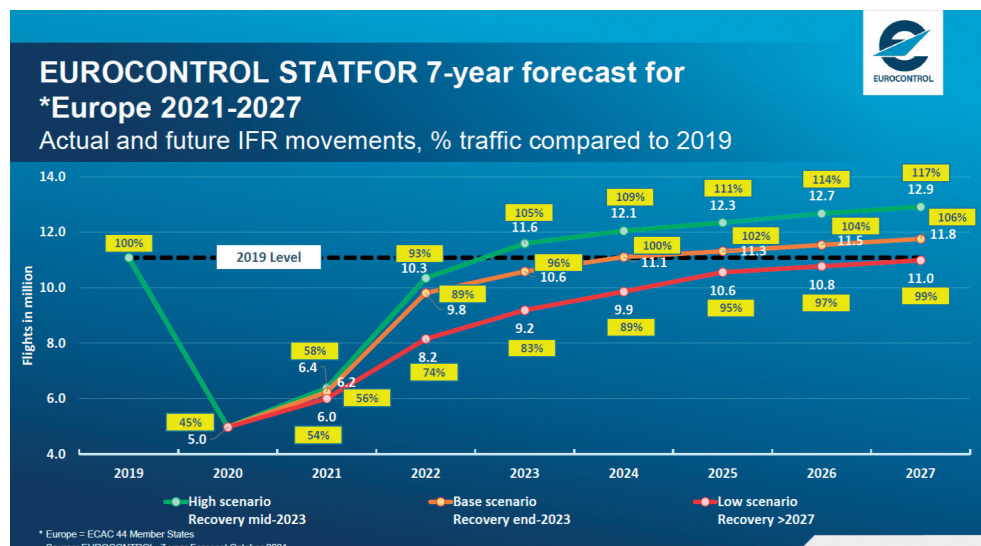
En 2004, l'Union européenne lance l'initiative « ciel unique européen » (Single European Sky 1-SES 1)

La circulation aérienne entre en 2004 dans le champ de compétence partagée entre l'Union européenne et ses États membres. Les règlements du ciel unique européen sont adoptés dans la foulée. Une coopération étroite s'établit d'emblée entre l'Union européenne qui apporte son pouvoir législatif et sa capacité budgétaire, et EUROCONTROL qui amène son expertise opérationnelle et technique ainsi que sa dimension pan-européenne avec aujourd'hui 41 États membres, soit bien au-delà des 27 membres actuels de l'Union. EUROCONTROL va devenir un acteur majeur dans la plupart des initiatives du ciel unique.

En 2007, l'Union européenne et EUROCONTROL fondent l'entreprise commune SESAR

Lancée en 2007, l'entreprise commune SESAR est chargée de développer le pilier technologique du ciel unique européen, selon le concept opérationnel de la trajectoire optimale (*business trajectory*). EUROCONTROL en est l'un des deux membres fondateurs, avec l'Union européenne. EUROCONTROL est notamment chargé de coordonner le plan directeur SESAR et d'apporter son expertise dans tous les domaines clés de la navigation aérienne, sa connaissance du réseau (CFMU), son expérience du contrôle en route (Centre de contrôle de Maastricht),

Évolution prévisionnelle du trafic pris en charge par EUROCONTROL.



sa capacité d'expérimentation et de simulation, et son savoir-faire en matière d'évaluation des performances et de coordination civile-militaire.

Le mandat de l'entreprise commune SESAR vient d'être récemment renouvelé. Plus de 80 solutions techniques et opérationnelles ont déjà été validées et mises à disposition de l'industrie. Un plan d'évolution, couvrant l'ensemble du cycle d'innovation (développement, déploiement, opérations) est en cours d'exécution.

En 2008, EUROCONTROL crée un centre d'expertise dédié à l'empreinte environnementale de l'aviation

La question de l'évaluation et du contrôle des nuisances environnementales de l'aviation devient sensible dès le début des années 2000. Pour répondre aux demandes d'expertise de l'Union européenne et des États, EUROCONTROL crée en 2008 une unité dédiée. Aujourd'hui, l'unité *Aviation Sustainability* est devenue le centre d'expertise de référence en Europe sur l'empreinte environnementale de l'aviation. La coopération avec l'Union européenne est très étroite. Cette unité fournit notamment les données opérationnelles pour les négociations internationales et le suivi des émissions de CO₂ (*Emission Trading Scheme* et *CORSIA*). Elle apporte une contribution majeure au programme d'innovation SESAR et à l'évaluation de la performance environnementale.

En 2010, l'Union européenne crée un organe d'évaluation des performances et confie cette fonction à EUROCONTROL (SES2)

L'Union européenne crée en 2010 un système de performance pour les services de navigation aérienne et désigne EUROCONTROL comme organe d'évaluation jusqu'en 2016. Depuis 2016, un organe indépendant a pris le relais, mais EUROCONTROL continue à apporter l'essentiel du travail d'expertise pour définir les objectifs de performance et suivre leur respect par les États et les prestataires de navigation aérienne.

En 2011, l'Union européenne confie à EUROCONTROL la fonction de Network Manager (SES2)

La fonction de gestionnaire de réseau (*Network Manager*) est créée par l'Union européenne en 2011, à la suite de la crise

Le siège d'EUROCONTROL à Bruxelles.

© sanderdewilde.com 2015



liée au volcan islandais Eyjafjallajökull en 2010. Elle est confiée d'emblée à EUROCONTROL qui se réorganise en conséquence en regroupant dans une même direction toutes les composantes nécessaires : la gestion des flux de trafic, l'organisation de l'espace aérien, la gestion des crises, la prévision du trafic, le suivi et l'analyse des retards, la gestion des fréquences radioélectriques et des codes radar.

Cette mission de *Network Manager* constitue aujourd'hui l'épine dorsale du ciel unique européen. Sa valeur ajoutée et son rôle opérationnel clé sont reconnus par tous les acteurs opérationnels du transport aérien : compagnies aériennes, aéroports, prestataires de service de navigation aérienne et aviations militaires.

Les résultats obtenus grâce au *Network Manager* sont impressionnants. Ainsi les efforts conjugués du *Network Manager* et des prestataires de services aériens ont permis de réduire les retards de 2,9 à 1,5 minute par vol entre 2010 et 2017, soit une baisse de 48 % (ils sont repassés au-dessus de 2,1 min/vol en 2018 et 2019, suite aux congestions de l'espace aérien). De même l'efficacité des trajectoires a été considérablement améliorée (-25 % d'extensions de route due à l'organisation de l'espace aérien entre 2011 et 2019, soit environ 37 millions de nautiques de vol et environ 400 kilotonnes de CO₂ en moins en 2019).

En 2014, l'Union européenne crée le SESAR Deployment Manager

Le *SESAR Deployment Manager* est créé en 2014 pour coordonner et accélérer le déploiement des nouveaux systèmes issus du programme SESAR.

EUROCONTROL, dans son rôle de *Network Manager*, y est associé dès le début par un accord de coopération et voit son implication renforcée en 2021 avec son inclusion parmi les membres fondateurs et l'attribution qui lui est faite du rôle de coordonnateur.

En 2019, l'Union européenne lance une nouvelle étape du ciel unique (SES 2+)

Il s'agit de renforcer encore le ciel unique, notamment dans sa capacité à réduire l'empreinte environnementale de l'aviation. Cette initiative est actuellement en débat entre les différentes institutions européennes, la Commission, le Conseil et le Parlement. Un consensus semble notamment se dégager pour donner de nouvelles responsabilités au *Network Manager*. EUROCONTROL y sera donc une nouvelle fois associé.

Conclusion : une coopération réussie et prometteuse

C'est une coopération originale, pragmatique et fructueuse que l'Union européenne et EUROCONTROL ont su établir depuis près de 20 ans pour le développement du ciel unique européen. Grâce à elle, un dispositif réglementaire et opérationnel efficace est aujourd'hui en place et les résultats sont là. Nul doute que cette coopération ne soit mise de nouveau à contribution très prochainement pour relever le défi énorme que représente la décarbonation de l'aviation. ●

Hydrogène : le courage d'oser

L'hydrogène, l'une des technologies zéro émission les plus prometteuses, permettrait à plusieurs industries d'atteindre leurs objectifs de neutralité climatique. Airbus, pionnier d'une industrie aéronautique et spatiale durable, a fait de cette énergie l'une de ses priorités. L'adoption massive de l'hydrogène à partir de 2035 dépendra de la capacité de l'entreprise à relever le défi technologique et à impulser la transformation de tout un écosystème.



© Airbus - Kristina Bandic

Glenn Llewellyn,

Vice President, Airbus, en charge
des avions zéro émission

L'HYDROGÈNE AU CŒUR DE L'ENGAGEMENT D'AIRBUS

Il y a cinq ans à peine, la propulsion à l'hydrogène ne figurait même pas sur notre feuille de route de technologies viables pour réduire drastiquement nos émissions. Mais des données convaincantes provenant d'autres industries du transport ont rapidement changé la donne. Aujourd'hui, l'incroyable potentiel que l'hydrogène offre à l'aviation en termes de réduction massive des émissions est enthousiasmant.

L'hydrogène est au cœur de l'engagement d'Airbus vers une aviation décarbonée. Son déploiement s'inscrit pleinement dans la feuille de route de l'aviation internationale et européenne qui vise à réduire de 55 % les émissions de gaz à effet de serre d'ici à 2030 (par rapport à 1990) et à atteindre zéro émission nette dès 2050.

L'adoption massive de ce mode de propulsion par l'ensemble des acteurs du secteur à l'échelle de la

planète nécessite que nous relevions collectivement des défis de plusieurs natures. Le premier est technique. Il s'agit de développer et certifier un appareil fonctionnant à l'hydrogène liquide comme source d'énergie primaire.

TROIS CONCEPTS D'AVION

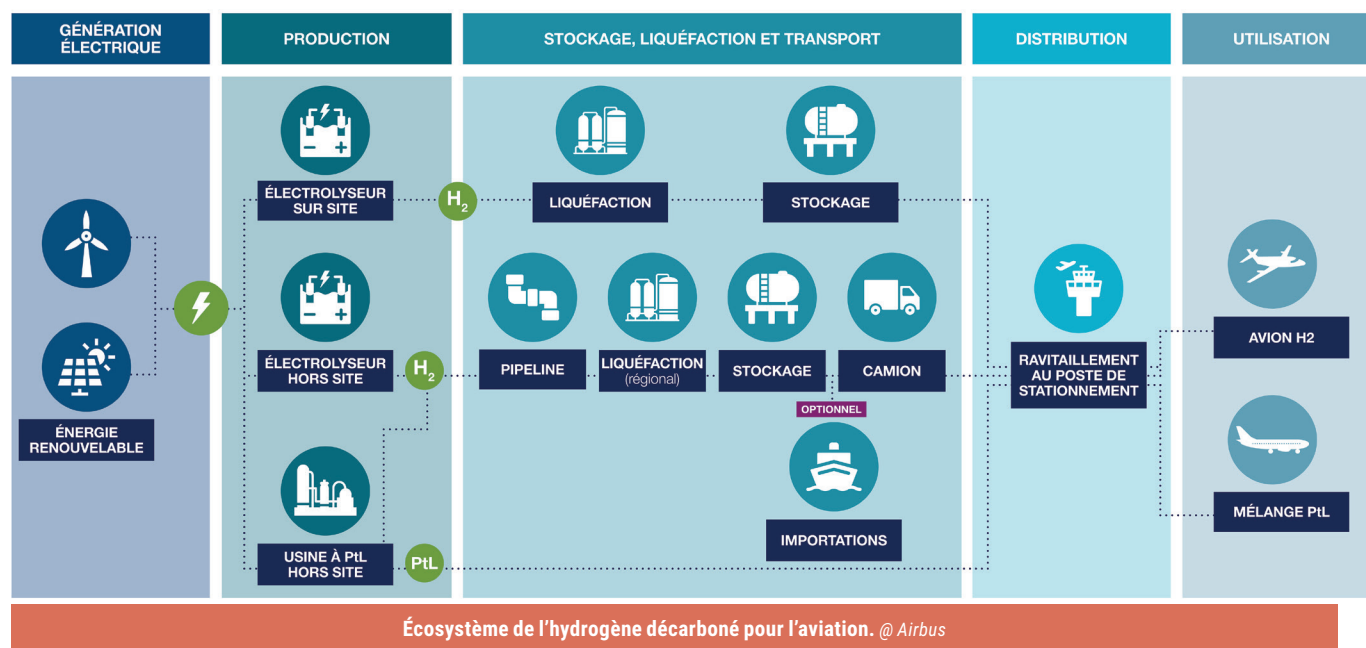
Airbus s'est engagé à mettre en service un tel avion en 2035. C'est l'objet du projet « ZEROe », dont le nom porte l'ambition d'un appareil qui n'émettra pas de CO₂ alors qu'il sera en opération. Nous travaillons sur trois concepts d'avion, répondant chacun à des segmentations spécifiques de marché.

Le premier est un « turbopropulseur » (jusqu'à 100 passagers, 1 800 km) alimenté par la combustion d'hydrogène dans des moteurs à turbine à gaz modifiés associée à des piles à combustible.

Le deuxième concept est un « Turbofan » (jusqu'à 200 passagers, 3 700 km). Disposant d'un mode de



Vol en formation du
concept d'avion ZEROe.
@ Airbus.



propulsion similaire, il remplacerait les appareils moyens-courriers.

Le troisième concept est une aile volante (jusqu'à 200 passagers, 3 700 km) qui, grâce à ses grandes dimensions, ouvre de multiples options pour le stockage et la distribution de l'hydrogène.

DES SAUTS TECHNOLOGIQUES IMPORTANTS

Au global, l'idée est de tester différentes technologies en vue d'une validation des choix finaux pour 2025, pour une entrée en service au milieu de la décennie suivante. Il s'agit d'un agenda extrêmement agressif tant les sauts technologiques sont importants. Dans ce laps de temps très court, il faudra certifier l'avion lui-même pour garantir le niveau de sécurité attendu.

Le développement de la technologie d'ici 2035 est un aspect essentiel du défi, mais il n'est pas le seul. Un autre enjeu, tout aussi capital, sera de disposer de l'hydrogène, qui exige quatre fois plus d'espace de stockage que le kérosène, au bon moment, au bon endroit, dans les quantités requises et à un prix acceptable.

La production et la mise à disposition dans les aéroports de la nouvelle source d'énergie seront des facteurs critiques, qui nécessitent dès à présent la mobilisation de l'écosystème et notamment des compagnies aériennes, aéroports, autorités, acteurs financiers, entreprises des secteurs du transport terrestre et de l'énergie.

DES INVESTISSEMENTS CONSIDÉRABLES. UN ENGAGEMENT PARTAGÉ

Les investissements nécessaires pour permettre cette transition énergétique sont immenses et toutes les solutions sont envisagées. Ainsi, une étude récente

de l'Agence internationale de l'énergie suggère que la réutilisation des infrastructures existantes, notamment les millions de kilomètres de pipelines utilisés aujourd'hui pour transporter le gaz naturel, pourrait être une solution rentable pour acheminer de grandes quantités d'hydrogène des sites de production jusqu'aux aéroports, tandis que les petites quantités pourraient être transportées par camion. En outre, certains sites aéroportuaires pourraient développer l'infrastructure nécessaire pour produire de l'hydrogène sur place, notamment si une source d'énergie renouvelable se trouve à proximité.

Airbus s'engage pour développer l'usage de l'hydrogène. Par exemple, en partenariat avec Air Liquide et VINCI, nous préparons la mise en place, à partir de 2023, d'une station de distribution d'hydrogène gazeux à l'aéroport Lyon-Saint-Exupéry. Cette station permettra dans un premier temps d'alimenter à la fois les véhicules terrestres (bus, camions, engins de maintenance...) de l'aéroport et ceux de ses partenaires, mais également les poids lourds qui circulent aux abords. Elle sera ensuite équipée des infrastructures permettant le chargement des aéronefs en hydrogène puis, à partir de 2030, des moyens de production de cette énergie. C'est à cette date que sera étudiée l'opportunité de déployer ce dispositif au réseau européen de VINCI Airports.

Comme l'illustre ce partenariat, le développement de l'hydrogène au sein de l'écosystème aéroportuaire dépend de l'engagement commun des partenaires et de la volonté de tous de collaborer.

Nous savons que les évolutions techniques et logistiques nécessaires à l'adoption massive de l'hydrogène seront le fruit d'une démarche collective, solidaire et mondiale. Sur cette voie, Airbus s'engage résolument en pionnier avec la conviction que l'ensemble de ses partenaires aura aussi le courage d'oser. ●

L'avion tout électrique : c'est possible



L'avion biplace à propulsion électrique INTEGRAL E.

@ AURA AERO



© AURA AERO

Jérémie Caussade,
président d'AURA AERO

Dans un hangar de l'aéroport de Toulouse Franczal, une équipe de startups de l'aviation s'affaire au sein même du bâtiment qui fut le premier de l'Armée de l'Air française. L'enjeu est essentiel pour la jeune société AURA AERO : il s'agit de permettre d'ici à l'été 2022 le premier vol de son avion tout électrique, le biplace INTEGRAL E. Fort de cette expérience, un avion régional de 19 places suivra. Jérémie Caussade, co-fondateur et président d'AURA AERO nous explique...

Jérémie Caussade : Il n'est guère besoin d'expliquer les avantages d'un avion tout électrique : plus de kérosène donc plus aucune émission de CO₂ et de NOx, plus d'effets de traînée (ce qu'on appelle les effets non-CO₂ qui sont largement aussi pernicieux pour le climat que les émissions de CO₂) et moins de bruit. On comprend facilement que l'avion tout électrique bénéficiera, comme la voiture électrique, d'une chaîne de motorisation simplifiée, plus facile à assembler et à entretenir et vous savez que la maintenance est un facteur clé pour l'aviation.

Contrairement à ce que beaucoup pensent, pour les petits avions, les technologies de base sont disponibles et notre société a pour principe de ne recourir qu'à des technologies à minima parvenues aux TRL 5 ou 6¹. La difficulté est de les intégrer de façon éco-efficace dans un système cohérent et optimisé pour offrir, à un prix concurrentiel, des performances répondant à des segments de marché.

Votre premier créneau est celui des avions biplaces pour la formation, le loisir et la voltige. Où en êtes-vous du développement de cette gamme INTEGRAL ?

J. C. : L'INTEGRAL E appartient à la famille des INTEGRAL qui sont des avions biplaces conçus dans une optique de maîtrise des coûts d'opération, de sécurité, de préoccupation environnementale et d'ergonomie. Aujourd'hui, les versions R et S, dotées d'un moteur thermique et permettant de franchir jusqu'à 1 100 km, sont en cours de certification. Nous prévoyons d'en construire une quinzaine en 2022 et une trentaine en 2023.

L'INTEGRAL E est doté d'un moteur électrique alimenté à partir de batteries au lithium. Il est en cours de développement et nous espérons le faire voler dès l'été 2022 pour commercialisation fin 2023. Nous avons déjà reçu des commandes et nous sommes confiants sur le déroulement de ce programme.

La batterie est évidemment un élément clé. Pouvez-vous nous parler des performances ?

J. C. : Nous avons noué un partenariat avec l'un des promoteurs de *giga-factory* de batteries Li-ion et les batteries dont nous allons équiper nos avions seront au meilleur niveau de l'état de l'art avec une capacité massive de l'ordre de 200 à 300 Wh/kg. À terme 400 Wh/kg nous semblent atteignables. Nous ne communiquons pas encore sur les performances de l'avion tant que les tests en vol n'ont pas été réalisés, mais il faut bien considérer que ces performances seront amenées à progresser. Un avion est conçu pour voler jusqu'à 50 ans et tout au long de son cycle de vie, nous pourrions upgrader les batteries en tirant parti du progrès technique. C'est une différence importante avec les automobiles dont la durée de vie est beaucoup plus courte. Mais pour être à même d'offrir ce service, il faut une intégration forte entre la batterie et l'avion et nous nous

1. TRL : Technology Readiness Level ou niveau de maturité technologique.

positionnons comme intégrateur de cellules pour assembler les batteries en fonction des exigences de l'avion.

Nous pourrions être amenés à proposer plusieurs versions, selon que l'on privilégiera la distance franchissable ou le poids.

Vous travaillez également sur un projet plus ambitieux d'avion électrique pour le transport régional.

J. C. : En effet, nous avons en chantier le développement d'un avion électrique hybride régional, l'ERA, ou *Electric Regional Aircraft*, qui sera capable d'emporter 19 passagers. Il pourra également être utilisé comme avion-taxi et pour le fret. Cet avion sera doté de six moteurs alimentés à partir de batteries. Mais l'avion sera également équipé d'un turbo-générateur capable, en mode hybride, de recharger les batteries. En

mode purement électrique, on vise une distance franchissable de 400 km mais en mode hybride l'avion pourra franchir jusqu'à 1 800 km.

Nous prévoyons un premier vol fin 2024 et une commercialisation en 2027. Clairement, l'avion répond à un besoin du marché et nous avons déjà reçu une importante lettre d'intention de commande.

Vous paraît-il possible d'aller au-delà de l'ERA et de développer des avions tout électriques plus importants ? Avez-vous songé à des solutions hydrogène ?

J. C. : L'ERA est aujourd'hui l'avion à propulsion électrique le plus gros qui puisse être envisagé. Comme je vous l'ai indiqué, nous ne prenons en considération que des technologies suffisamment matures. Les solutions hydrogène nous projetteraient trop loin dans le temps.

Comment voyez-vous l'avenir de la société ?

J. C. : Nous pensons que nous apportons une contribution positive au problème de la décarbonation du transport aérien. Nous démontrons que le transport aérien est compatible avec la préservation de l'environnement. Face aux attaques dont il est l'objet, le passage aux carburants durables est évidemment essentiel mais il ne règle pas tous les problèmes. L'avion à propulsion électrique a sa place à condition de bien choisir son créneau et nous apportons des solutions concrètes.

Notre société, créée en 2018, par trois co-fondateurs issus du monde de l'aviation, compte aujourd'hui une centaine de collaborateurs. Elle bénéficie du soutien de la Région Occitanie, de Bpifrance et du fonds de capital-innovation Innovacom. Mais pour répondre au marché et satisfaire nos ambitions, il faudra viser plus grand. Nous nouerons des partenariats mais aurons besoin de nouveaux moyens de financement. Il ne faut pas que la France passe à côté de la rupture industrielle et technologique que va constituer l'avion électrique. ●

Nous prévoyons un premier vol fin 2024 et une commercialisation en 2027



Les drones taxis ne sont plus de la science-fiction

La mobilité aérienne urbaine constitue une nouvelle conquête du ciel : celle de la basse altitude. C'est un nouveau territoire, jusqu'alors quasi inexploré, mais soutenu par une profusion d'offres technologiques autour du drone et du véhicule électrique à décollage vertical. Mais de multiples défis restent à relever...

La mobilité aérienne urbaine à basse altitude va préfigurer l'aviation zéro émission, avec des véhicules pour une large majorité 100 % électriques, tandis que certains émergent autour de l'hydrogène. Cette technologie, qui repose sur un principe de propulsion distribuée, va également permettre de diminuer drastiquement l'empreinte sonore par rapport aux technologies plus conventionnelles comme les hélicoptères. La promesse des constructeurs est celle d'une offre de service rapide, flexible, accessible et à faible coût d'infrastructure. Il s'agira d'un mode de transport complémentaire aux offres de mobilité existantes.

LA TECHNOLOGIE DU DÉCOLLAGE VERTICAL EST DÉJÀ UNE RÉALITÉ, L'ACCEPTABILITÉ RESTE À DÉMONTRER

Soutenu par une massification des offres autour du drone électrique pour des applications très larges, qu'elles soient logistiques, médicales ou militaires, le marché de la mobilité aérienne urbaine électrique de passagers est évalué à 30 milliards d'euros dès 2035 (étude Oliver Wyman).

Dans ce contexte foisonnant, près de 200 projets de véhicules ont trouvé un financement dans le monde pour un montant total estimé à trois milliards d'euros, avec des prises de position de la part des constructeurs automobiles (Geely, Daimler, Toyota ou Hyundai) et d'acteurs technologiques de premier plan (Tencent, Baillie Gifford, Uber...). Les principaux constructeurs de eVTOL (*electric Vertical Take Off and Landing*), qu'ils soient grands groupes ou start-ups ont

déjà démontré leur capacité à faire voler des engins et à développer des véhicules susceptibles d'obtenir une certification aérienne d'ici 2 à 4 ans.

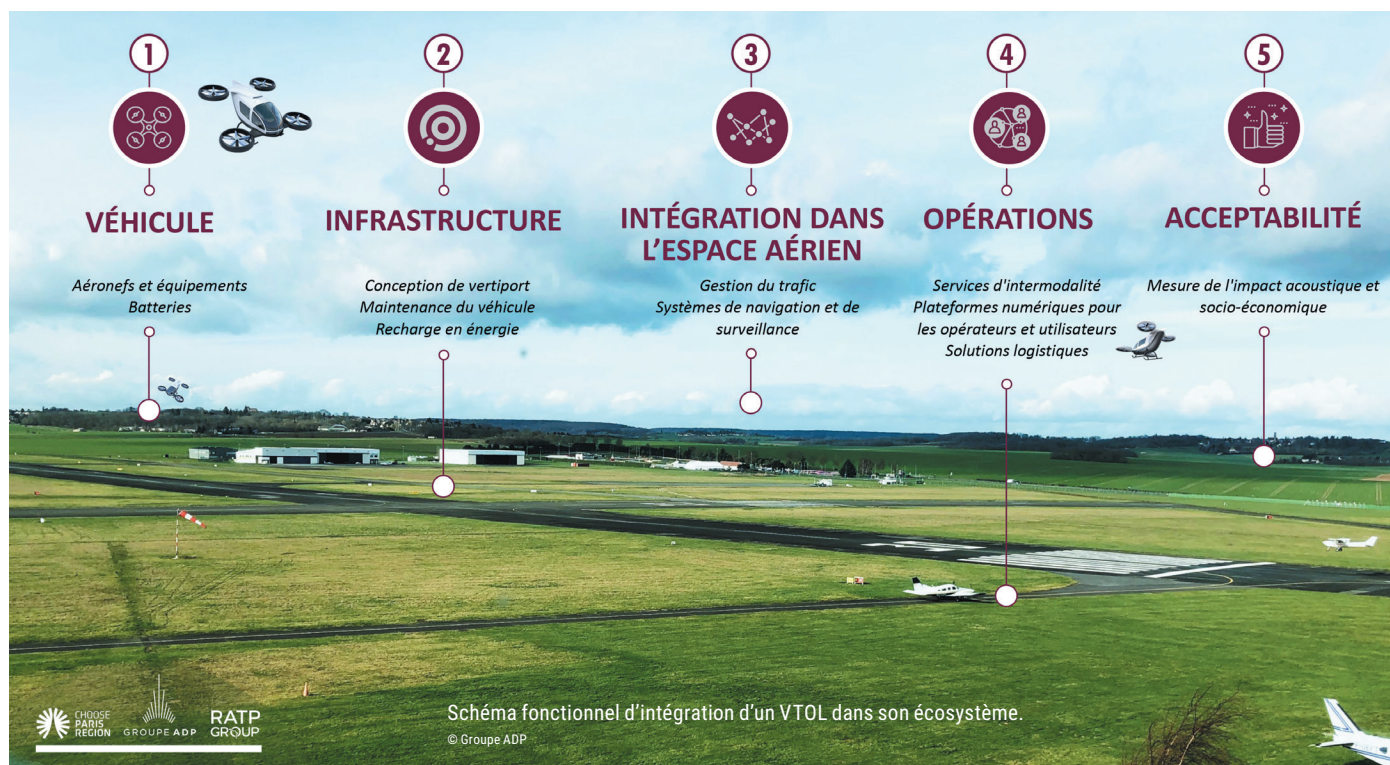
Si la maturité technologique des véhicules progresse très vite, elle se trouve confrontée à un défi majeur d'acceptabilité, tant vis-à-vis de son intégration en environnement urbain (impact acoustique, insertion architecturale, sécurité...) que de son usage (nature du service proposé, accessibilité, intermodalité...).

L'Île-de-France, en tant que zone économique de premier plan, présente un écosystème industriel et de recherche exceptionnel, une visibilité mondiale et un marché de la mobilité très dynamique



Sébastien Couturier,
directeur de l'Aéroport
Paris-Le Bourget et des
Aérodromes d'Aviation
Générale





qui offre un berceau favorable à l'émergence de cette industrie. En outre, la perspective des Jeux olympiques et paralympiques de 2024 constitue un catalyseur exceptionnel pour mobiliser les acteurs et positionner la France comme pays de référence sur ce marché mondial dans la perspective d'un déploiement à horizon 2030.

UNE ZONE EXPÉRIMENTALE UNIQUE EN ÎLE-DE-FRANCE SUR L'AÉRODROME DE PONTOISE

Une grande attention est traditionnellement portée au véhicule mais nous avons la conviction, au sein du Groupe ADP, qu'une attention aussi importante doit être portée aux conditions d'intégration de ce nouveau mode de transport dans une infrastructure et dans l'espace aérien. C'est le sens du lancement d'une zone de test en septembre dernier.

Après une analyse multicritères entre le Groupe ADP et la Direction générale de l'aviation civile (DGAC), en matière de contraintes aéronautiques, d'accessibilité, d'attractivité de la zone et de disponibilité foncière, c'est l'aérodrome de Pontoise-Cormeilles-en-Vexin qui a été choisi pour accueillir le lancement des premiers tests.

Première étape : l'aménagement d'une zone de test sécurisée sur l'aérodrome, ouverte à l'ensemble de l'écosystème,

avec pour vocation d'accueillir différents constructeurs pour évaluer leur capacité à répondre aux contraintes d'une opération réelle, mais aussi de tester l'intégration dans le trafic aérien. Le site comprendra un lieu de maintenance et de stockage. Le hangar permettra de tester le parcours du passager en salle d'embarquement, tout en abritant les bureaux d'études et la zone de préparation des véhicules.

UN ÉCOSYSTÈME PROPICE À LA CO-CONSTRUCTION DES USAGES AVEC LA PERSPECTIVE DES JO 2024

Avec l'appui de l'agence d'attractivité *Choose Paris Region*, le soutien de la région Île-de-France et au travers d'une collaboration étroite avec la Direction générale de l'aviation civile, l'*European Union Aviation Safety Agency* (EASA) et *Eurocontrol*, les groupes ADP et RATP ont lancé un appel à manifestation d'intérêt d'envergure mondiale, *Re.Invent Air Mobility*, pour attirer les meilleurs acteurs institutionnels, industriels ou start-ups. Plus de 150 entités y ont répondu, dont les principaux constructeurs du secteur, et les 30 lauréats ont été annoncés début janvier 2021 afin de procéder aux premiers tests dès septembre 2021.

Dans ce cadre propice à l'innovation, les partenaires, en lien avec le régulateur répondront aux multiples problématiques clés qui ont été regroupées dans trois

domaines : acceptabilité, maturité technologique et environnement réglementaire.

Durant les premières années, la présence d'un pilote à bord sera à la fois rassurante pour les passagers et sécurisante du point de vue aéronautique. Progressivement, pourra être envisagée une transition vers des modules autonomes en passant par des phases d'assistance au pilotage à bord, puis de pilotage depuis le sol avant d'aller vers une automatisation des tâches.

Pour préparer une démonstration de services lors des JO 2024 de Paris, la méthodologie *test and learn* propre à toute démarche d'innovation va permettre de confronter à la réalité les promesses des constructeurs. Il s'agit de créer une plate-forme d'expérimentation unique en Europe, en environnement réel, afin de réunir les industriels, les autorités et le grand public et d'expérimenter les différentes fonctions du système : parcours client, intégration dans le contrôle aérien, gestion de l'énergie, maintenance...

Bien plus qu'un laboratoire technologique, le site de Pontoise va permettre en associant les communautés locales et le grand public de mesurer l'acceptabilité sociale, les usages et finalement de démontrer la création de valeur pour la société. À l'heure où le transport aérien traverse la plus grave crise de son histoire, nous sommes engagés dans une aventure digne de celle des pionniers de l'aviation et nous avons de formidables atouts à faire valoir. ●

Les carburants aériens durables : une solution incontournable pour réduire les émissions du secteur

Face aux nombreux défis que doivent relever les acteurs de l'aérien, sur les plans économiques, technologiques, mais aussi environnementaux, les carburants d'aviation durables sont une solution efficace, technologiquement éprouvée et déjà disponible pour atteindre les objectifs ambitieux de réduction des émissions du secteur.

UN DÉFI MONDIAL, PLUSIEURS SOLUTIONS QUI COHABITENT

En 2019, avant la crise sanitaire, la consommation de carburants pour l'aérien représentait environ 300 Mt, soit près de 6 % de la consommation mondiale de produits pétroliers. En termes d'émissions de CO₂, cela correspond à un milliard de tonnes émises, soit 2 à 3 % des émissions mondiales.

Le constat est relativement unanime pour les acteurs du secteur : plusieurs solutions devront coexister pour réduire les émissions : efficacité énergétique des moteurs, optimisation du pilotage et des couloirs aériens ainsi que des opérations au sol et, surtout, utilisation de carburants d'aviation durables, dits SAF (Sustainable Aviation Fuels).

« TotalEnergies, en tant que compagnie multi-énergies et acteur majeur de la production et de la distribution de carburants aériens, partage pleinement la



Jean-Marc Durand,
directeur Raffinage BaseChem Europe
et directeur par interim Renewable
Fuels, TotalEnergies

démarche amorcée par le secteur pour réduire ses émissions. Notre compagnie a pour ambition d'atteindre la neutralité carbone à horizon 2050, ensemble avec la société. Depuis plus de 10 ans, TotalEnergies est engagée dans le développement de solutions durables pour la décarbonation de l'aérien. Nous avons avitaillé de nombreux vols avec du carburant aérien durable, et ce depuis 2014 avec un premier vol de Orlando à Sao Paulo et l'approvisionnement d'un vol hebdomadaire pendant

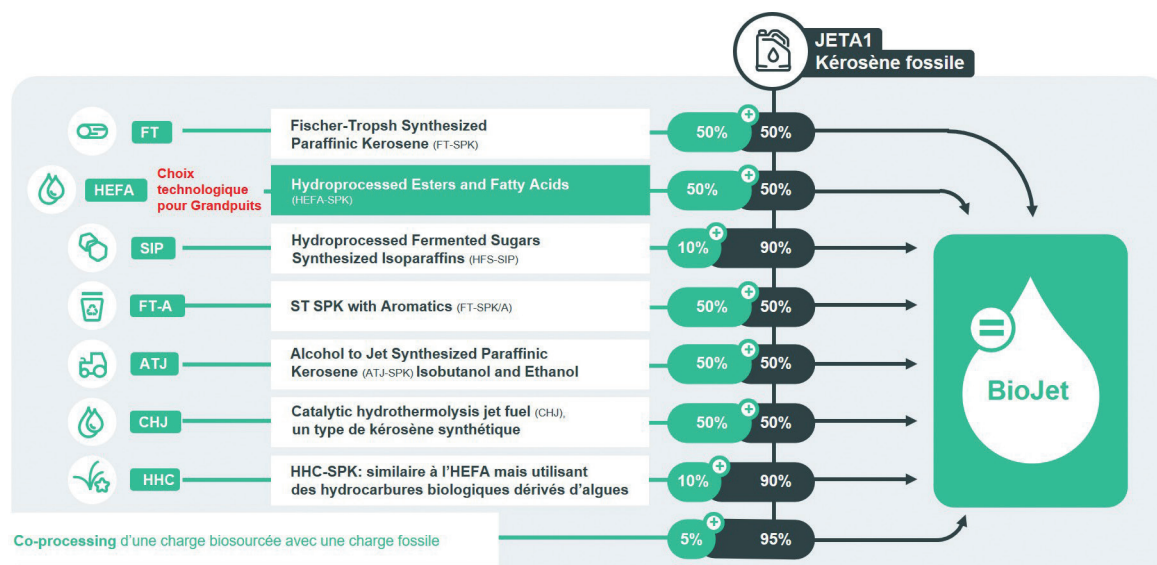


Fig. 1 : Les sept technologies de production de SAF. @TotalEnergies

Fig. 2 : Visualisation de la future plate-forme zéro pétrole de Grandpuits.

@Detienne Augustin - CAPA Pictures - TotalEnergies.



un an de Paris à Toulouse et surtout, dernièrement, en mai 2021 avec le premier vol long-courrier Paris-Montréal, ou encore début octobre, le vol Nice-Paris alimenté avec 30 % de SAF. Enfin, depuis juin 2021, nous avons développé une offre SAF permanente pour l'aviation d'affaires à partir de l'aéroport du Bourget » indique Joël Navaron, directeur Aviation de TotalEnergies.

QU'EST-CE QU'UN CARBURANT D'AVIATION DURABLE OU SAF ?

SAF signifie *Sustainable Aviation Fuel*. C'est le terme employé par l'industrie aérienne pour désigner un carburant alternatif issu de matières premières durables. Il faut distinguer le *neat SAF*, la biomolécule, et le SAF, qui est un mélange de carburant aérien conventionnel (Jet A-1) et de cette biomolécule. Le *neat SAF* possède des caractéristiques d'usage similaires à celles du Jet A-1 et permet une réduction des émissions de CO₂ allant jusqu'à 90 % sur l'ensemble du cycle de vie par rapport à son équivalent fossile.

Il existe à ce jour sept technologies de production de SAF homologuées par l'ASTM (*American Society for Testing of Materials*), qui est l'organisme qui rédige et produit des normes techniques internationales, notamment pour les carburants aviation.

Parmi ces technologies, certaines ont un niveau de maturité industrielle avancé, permettant déjà de fabriquer des biocarburants incorporables jusqu'à 50 % dans le carburant conventionnel :

- **les HEFA** (*Hydroprocessed Esters and Fatty Acids*) : c'est la technologie la plus présente, car la seule arrivée au stade commercial à ce jour. La matière première utilisée est issue de déchets et de résidus issus de l'économie circulaire, comme les huiles de cuisson usagées ;
- **l'ATJ** (*Alcohol to Jet*) : en phase de pré-industrialisation, cette technologie pourrait offrir une flexibilité intéressante sur les matières premières, comme les gaz d'industrie ou la lignocellulose (déchets végétaux), servant à la production de l'éthanol ;

- **les carburants FT** (*Fischer Tropsch*) : cette voie de production s'appuie sur des matières premières dites avancées, de type résidus agricoles ou forestiers ou déchets municipaux. Elle requiert des investissements très élevés pour une commercialisation à grande échelle.

On trouve également d'autres technologies à l'étude parmi lesquelles figure le co-processing, qui consiste à introduire dans les unités d'hydrosulfuration existantes au sein d'une raffinerie traditionnelle une charge biosourcée en même temps que la charge fossile utilisée habituellement. La réaction produite au sein de l'unité permet d'obtenir un produit similaire en termes de propriétés au produit fossile. On se retrouve alors avec un carburant aérien certifié contenant une partie biosourcée.

Enfin dans la famille des SAF, on peut inclure les e-fuels, c'est-à-dire des carburants synthétiques produits à base d'hydrogène issu idéalement d'électricité renouvelable et de CO₂, qui peut être extrait de l'air ambiant ou d'effluents industriels. Ces technologies, pour le moment au stade de la R&D, restent extrêmement coûteuses mais pourraient constituer une voie prometteuse à plus long terme.

« Au-delà de nos projets de production industrielle de SAF basés à ce jour sur la technologie HEFA, nous étudions d'autres voies de production, explique Virginie Merini, directrice Renewable Fuels de TotalEnergies. En particulier, nous intensifions nos efforts de R&D qui permettraient de produire des e-fuels pour répondre à la demande et aux attentes futures. »

...

Nous intensifions nos efforts de R&D qui permettraient de produire des e-fuels pour répondre à la demande et aux attentes futures

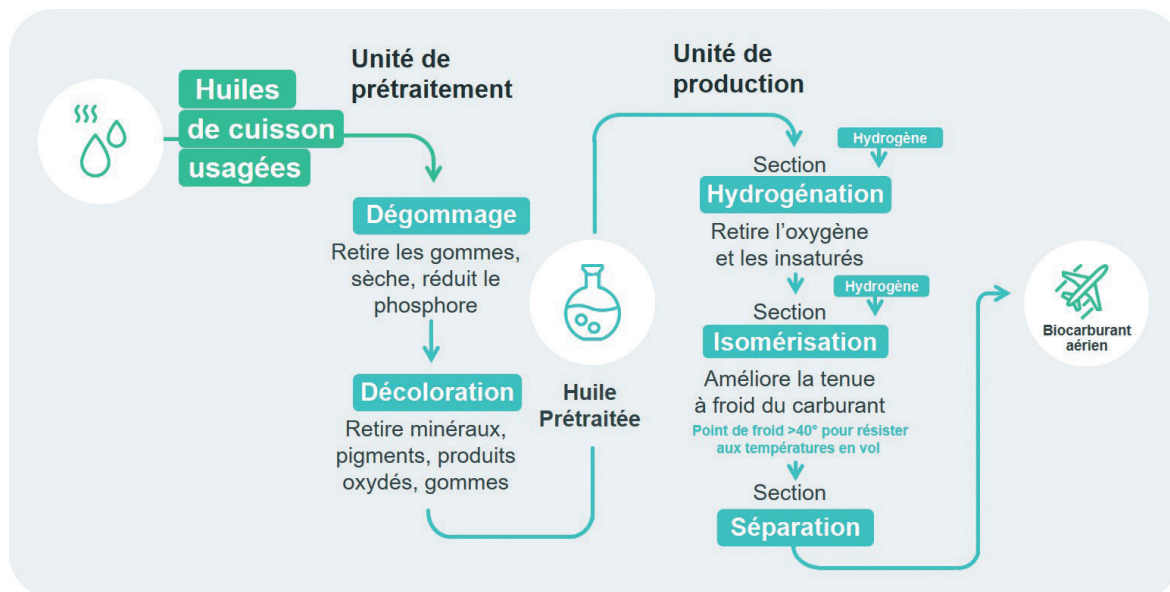


Fig. 3 : Schéma de production d'un SAF par voie HEFA. @TotalEnergies

COMMENT PRODUIT-ON UN SAF PAR VOIE HEFA ?

La technologie HEFA, aujourd'hui la plus mature, est celle sur laquelle TotalEnergies a fait le choix de se concentrer, dans un premier temps. La compagnie a annoncé, en septembre 2020, la transformation de sa raffinerie de Grandpuits, en région parisienne, en plateforme zéro pétrole. Celle-ci produira notamment du SAF par voie HEFA à partir de déchets et résidus tels que des huiles de cuisson usagées (UCO). Le démarrage des unités de production de carburants durables est prévu pour 2024.

Pour produire un SAF à partir d'huiles de cuisson usagées, il faut au préalable prétraiter ces huiles afin de les nettoyer et éviter d'endommager les unités de raffinage. L'huile prétraitée passe ensuite dans un processus de raffinage classique pour être hydrogénée et isomérisée, cette dernière étape lui permettant d'atteindre un point de congélation inférieur à -40 °C pour résister aux basses températures en vol.

L'unité BIOJET de la future bioraffinerie de Grandpuits a été dimensionnée en fonction des capacités des unités existantes de la raffinerie qui seront réutilisées. Elle pourra produire 170 000 tonnes par an de SAF.

En 2019, seulement 30 000 t de SAF ont été consommées au niveau mondial (environ 0,01 % du volume global de carburant aérien). Selon l'AIE (Agence internationale de l'énergie), la demande en SAF pourrait atteindre 8 à 20 millions de tonnes par an en 2030 et 20 à 60 millions de tonnes en 2040. Plusieurs freins restent encore à lever pour permettre leur déploiement à grande échelle et atteindre les prévisions de l'AIE.

LES MATIÈRES PREMIÈRES : UN DÉFI À RELEVER

En Europe, la réglementation exclut les huiles végétales. L'industrie se tourne donc vers des matières premières issues de l'économie circulaire, comme les huiles de cuisson usagées, les graisses animales, la biomasse

lignocellulosique (résidus non alimentaires des plantes) ou encore les déchets forestiers ou ménagers. Certaines de ces matières premières sont encore peu disponibles et leur collecte n'est pas simple. Pour développer la production des carburants aériens durables, il est donc nécessaire de mettre en place une véritable filière de collecte de déchets et résidus avec des entreprises spécialisées mais également de travailler sur la diversification de ces matières premières.

C'est donc un marché très tendu et concurrentiel. Il en résulte des coûts importants, conséquence d'une demande en pleine structuration et de procédés industriels encore en maturation à ce stade. Aujourd'hui, la production au niveau mondial est d'environ 100 000 t de SAF par an, alors que plus de 170 000 t seront nécessaires en 2025 pour couvrir les seuls besoins de la France. Ce chiffre correspond pour rappel à la capacité de production de SAF à horizon 2024 du site de Grandpuits.

L'utilisation plus massive des SAF est également conditionnée à des problématiques de coûts : le prix de revient du biocarburant produit selon la voie HEFA est au moins quatre fois supérieur à celui du carburant aérien conventionnel. « Nous savons aujourd'hui que les biocarburants, renouvelables par nature, constituent la meilleure alternative pour produire des carburants liquides », indique Joël Navaron. Mais leurs coûts sont élevés et la matière première nécessaire à leur fabrication relativement limitée. C'est le challenge actuel qu'ensemble nous devons relever alors que le carburant représente environ 30 % des dépenses de fonctionnement d'un avion. »

LE DÉVELOPPEMENT CONJOINT D'UNE FILIÈRE SAF AVEC LES ACTEURS DU SECTEUR AÉRIEN

Malgré ces freins, on constate que l'ensemble des acteurs du secteur aérien (motoristes, avionneurs, compagnie aérienne, énergéticien, etc.) est sur le pont et se mobilise pour développer cette nouvelle filière de carburants aériens durables. De nombreuses initiatives voient



le jour notamment entre acteurs des secteurs privé et public. *Clean Skies for Tomorrow* est l'une d'entre elles. Il s'agit d'un partenariat de recherche entre la Commission européenne et les acteurs de l'industrie aéronautique européenne qui a pour objectif principal de développer des technologies de rupture afin d'augmenter les performances environnementales des avions.

Des partenariats entre acteurs industriels se construisent également avec pour volonté de lever les contraintes techniques existantes. TotalEnergies et SAFRAN ont par exemple signé en septembre 2021 un partenariat stratégique en vue de développer des solutions techniques et commerciales pour répondre aux enjeux de la décarbonation du secteur aérien. L'un des objectifs à court terme est de parvenir à utiliser du SAF sans avoir besoin de le mélanger au préalable avec du jet fossile et de mettre en place l'ensemble des actions permettant d'atteindre un taux d'incorporation de 100 % dans les moteurs actuels. Pour y parvenir, TotalEnergies et SAFRAN travaillent ensemble sur des pilotes de recherche. En novembre dernier, à Marignane dans le sud de la France, un hélicoptère a ainsi volé avec 100 % de SAF. Un Airbus A319neo a également effectué un vol d'essai avec 100 % de SAF pour l'alimenter. Ces essais sont le début d'une longue série qui aura pour but d'analyser de manière pointue l'impact sur les moteurs et leur environnement d'une utilisation de SAF à 100 %. Cela participe de la mise en place d'un cadre réglementaire mondial indispensable à cette évolution primordiale.

Dans ce contexte complexe mêlant freins économiques et techniques et dynamique de coopération, l'un des principaux leviers qui doit être mis en place est un cadre réglementaire mondial pour l'aviation afin d'accélérer le développement de la filière SAF.

Dès 2022, la réglementation française impose un mandat d'incorporation de SAF à hauteur de 1 % sur les volumes mis à la consommation en France (loi de finance

Tableau 1 : Échéancier d'introduction des SAF dans les carburants pour l'aviation tel que prévu dans le projet de règlement ReFuelEU (juillet 2021).

Échéance	Proportion minimale de SAF	dont proportion minimale d'e-fuels
2025	2 %	
2030	5 %	0,7 %
2035	20 %	5 %
2040	32 %	8 %
2045	38 %	11 %
2050	63 %	28 %

pour 2021) et vise un objectif de 2 % à horizon 2025 et de 5 % à horizon 2030.

En Europe, les réglementations se développent progressivement. En juillet 2021, la Commission européenne a dévoilé ses propositions *Fit for 55* pour atteindre l'objectif de l'UE de réduire ses émissions de gaz à effet de serre de 55 % d'ici à 2030 par rapport à 1990. On pourra retenir parmi les nombreuses mesures proposées dans le cadre de l'initiative ReFuelEU - Aviation, la mise en place d'une production de biocarburants à 95 % européenne ainsi qu'une obligation pour les compagnies aériennes et les fournisseurs de carburant aérien, d'incorporer des SAF dès 2025, sous peine de pénalités financières. La proposition actuelle est d'incorporer de plus en plus de SAF selon l'échéancier encore provisoire du tableau 1.

Dans plusieurs pays, comme aux États-Unis (Californie) ou aux Pays-Bas, des politiques d'incitations sont lancées pour favoriser l'utilisation des SAF. La Norvège et la Suède ont également déjà lancé des mandats d'incorporation, respectivement en 2020 et 2021.

On constate donc que les politiques publiques se mettent en place, par le biais d'incitations, de mandats ou d'appels à projets, afin de soutenir la filière industrielle et de préparer dès aujourd'hui, avec les autres acteurs de l'aérien, le paysage de demain. ●

Les aéroports : catalyseurs du transport aérien bas carbone



CDG Jetée du hall K terminal 2E.
©Arnaud Gaulupeau, Groupe ADP

Pour devenir de véritables plates-formes de connectivité bas carbone, les aéroports doivent investir non seulement pour réduire leurs émissions internes, mais aussi pour accompagner la décarbonation de leurs parties prenantes, au premier rang desquelles les autres acteurs du transport aérien. Une mission difficile à laquelle Groupe ADP a décidé de s'atteler.



Amélie Lummaux,
directrice du Développement durable et des Affaires publiques de Groupe ADP

QU'EST-CE QU'UN AÉROPORT BAS CARBONE ?

Dans le monde, 373 aéroports situés dans 76 pays participent aujourd'hui au programme *Airport Carbon Accreditation* (ACA), programme instauré par l'Association internationale des aéroports (ACI). Parmi ces aéroports, 58 sont labellisés neutres en carbone (niveau ACA3+) et neuf ont démontré une trajectoire de réduction de leurs émissions internes de CO₂ alignée avec les objectifs mondiaux de lutte contre le changement climatique, scénario 1,5°C du GIEC. Les aéroports parisiens de Groupe ADP sont impliqués dans une trajectoire active de réduction de leurs émissions internes (-65 % en valeur absolue depuis 2009) et ont pris l'engagement d'atteindre la neutralité carbone en 2030 au plus tard.

Ces résultats encourageants soulèvent néanmoins des interrogations de nombreux observateurs. Que signifie donc la neutralité carbone selon le programme ACA ?

La définition en est très claire : il s'agit d'avoir réduit ses émissions de CO₂ par passager selon les scopes 1 et 2 définis par le GHG Protocol¹ (émissions directes et émissions liées à l'achat d'énergie), de compenser les émissions résiduelles sur ce même périmètre, ainsi que celles liées aux déplacements professionnels des salariés de l'exploitant aéroportuaire, par des crédits carbone de haute qualité environnementale, et d'avoir engagé des actions concrètes pour encourager la réduction des émissions des parties prenantes relevant du scope 3 du GHG Protocol. Les aéroports engagés dans le programme publient de manière transparente la cartographie de leurs émissions, les leviers employés pour les réduire et le volume éventuel de compensations achetées, le tout étant audité par un tiers indépendant.

IL FAUT ALLER AU-DELÀ DES SCOPES 1 ET 2

Les critiques, pourtant, sont nombreuses et doivent être entendues. En pratique, les émissions du scope 1 et 2 représentent environ 3 à 5 % des émissions de CO₂ dites "aéroportuaires". Ces émissions sont non seulement celles des installations correspondant aux scopes 1 et 2 (terminaux, transports, parkings, etc.), mais aussi celles des accès des passagers et des salariés, des émissions des aéronefs au stationnement et sur le cycle LTO (Atterrissage – Roulage – Décollage) et celles de l'assistance en escale. Les émissions liées aux accès pèsent pour environ un tiers du quantum déclaré à l'ACA, tandis que les émissions liées au cycle LTO des avions et à l'assistance en escale avoisinent les deux tiers.

Ce constat appelle deux réactions immédiates : si les actions sous responsabilité directe relevant des scopes 1 et 2 sont indispensables, elles ne peuvent être considérées comme suffisantes au vu de l'ampleur du scope 3 et l'exploitant aéroportuaire doit favoriser la transition énergétique de l'ensemble de sa chaîne de valeur, des accès aux plates-formes jusqu'aux émissions des avions en vol. À la

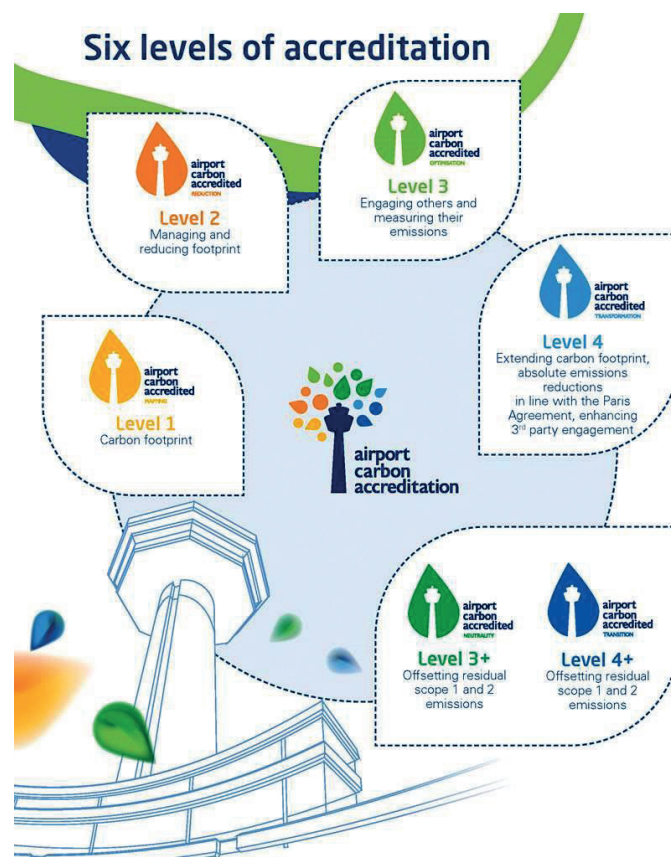


Fig. 1 : Les six niveaux de certification de l'Airport Carbon Accreditation program.

fois l'exercice de connaissance des émissions imposé par le programme ACA (portant sur l'ensemble du périmètre d'influence aéroportuaire) et l'effort d'exemplarité qui en découle, sont indispensables et doivent être poursuivis.

CHAQUE ACTEUR AÉROPORTUAIRE DOIT MENER LES ACTIONS NÉCESSAIRES

Chaque acteur doit s'imposer de rechercher tous les leviers permettant de ramener à zéro son impact direct sur le climat. Pour les infrastructures aéroportuaires, cet impact est essentiellement lié au CO₂. C'est ainsi que sur ses plates-formes franciliennes, Groupe ADP développe depuis plusieurs années des installations de production de chaleur renouvelables (centrale géothermique en service à Paris-Orly et en projet à Paris-Charles de Gaulle, centrale biomasse à Paris-Charles de Gaulle), convertit l'ensemble de sa flotte de véhicules vers du bas carbone (33 % fin 2020), rénove les bâtiments dans l'objectif de renforcer la sobriété énergétique (-28,4 % kWh/m² fin 2020 vs. 2015) et achète 100 % d'électricité verte (depuis début 2021), dont une part croissante par approvisionnement direct auprès d'un producteur d'électricité renouvelable selon le mécanisme de *Corporate Power Purchase Agreement*. Ce sont ces leviers qui ont permis aux aéroports parisiens de réduire de 111 000 tonnes les rejets de CO₂ dans l'atmosphère entre 2009 et 2019. Les émissions internes ...

1. Standard de reporting développé conjointement par le World business Council for Sustainable Development (WBCSD) et le World Resources Institute (WRI) et reconnu internationalement, tant par les gouvernements que par les associations et entreprises.

de CO₂ devraient continuer de réduire dans les années à venir, pour atteindre moins de 12 000 tonnes en 2030, avant compensation.

La standardisation des méthodes de reporting que propose le programme ACA, précurseur dans ce domaine à l'échelle d'un secteur économique entier, facilite la mobilisation des opérateurs aéroportuaires partout dans le monde, renforce la lisibilité des actions, et permet de fixer de manière collective des nouveaux jalons et horizons à atteindre. On peut noter qu'en 2020, au plus fort de la crise du transport aérien liée à la Covid, l'ACI a annoncé la création de deux niveaux supplémentaires de l'ACA, dont notamment le niveau ACA 4. Ce dernier correspond à la fixation d'une trajectoire de baisse en valeur absolue des émissions compatible avec celle des accords climatiques mondiaux et intègre de nouveaux postes d'émissions, dont ceux liés aux engins de chantiers. Pour Groupe ADP, gestionnaire de 28 aéroports dans le monde, situés dans 15 pays dont les niveaux de maturité en matière d'actions climatiques varient fortement, le programme ACA est un formidable outil d'entraînement. Six aéroports du réseau étaient labellisés neutres en carbone en 2020 (Amman, Izmir, Ankara, Antalya, Delhi et Hyderabad), et début 2021, 23 aéroports du réseau ont pris l'engagement, comme les plates-formes franciliennes, de l'être au plus tard en 2030.

CES EFFORTS SONT CEPENDANT LOIN D'ÊTRE SUFFISANTS SI ENTREPRIS SEULS.

Chaque entreprise est aujourd'hui interpellée sur son scope 3, c'est-à-dire sur les émissions de ses parties prenantes, et sommée d'intervenir sur l'ensemble de sa chaîne de valeur, des fournisseurs aux clients. C'est sans doute encore plus vrai pour les aéroports, dont le modèle d'affaires repose par essence sur l'intégration d'un certain nombre de services, sur un territoire géographique donné.

Les aéroports ont d'ores et déjà commencé à travailler sur plusieurs actions prioritaires, correspondant aux émissions de leur périmètre d'influence. Les défis sont nombreux, mais doivent permettre d'envisager la définition d'une cible d'émission portant sur l'aéroport dans une définition élargie, en tant que territoire à part entière.

Les avions en stationnement et les engins d'assistance

Les émissions des avions au stationnement et des engins d'assistance en escale constituent la première étape de cette transition. Depuis 2015, l'ensemble des postes avions au contact de Paris-Charles de Gaulle et Paris-Orly sont équipés en moyens de substitution à l'usage des moteurs auxiliaires de puissance (APU) pour la fourniture d'électricité, anticipant ainsi de 10 ans la première échéance prévue par la proposition de règlement de la Commission européenne sur le déploiement des infrastructures de recharge en énergie alternative (AFIR), et conduit à une diminution drastique des émissions. D'ici 2030 au plus tard, l'ensemble des postes au contact et au large permettront la fourniture d'électricité

et le branchement d'équipements électriques de chauffage et de climatisation. L'assistance en escale (véhicules de transport des bagages et de fret, push avions, élévateurs, nacelles, camions variés tels que les oléoserveurs, etc) est également en pleine transformation, encouragée par l'action des exploitants aéroportuaires. Les licences d'assistance en escale récemment renouvelées à Paris-Charles de Gaulle et Paris-Orly prévoient une cible de 75 % de véhicules et engins bas carbone dès 2025, pour atteindre plus de 90 % en 2030. Les efforts de réduction des consommations de kérosène lors de la phase de roulage avion participent également de la baisse des émissions de CO₂ au sol.

L'accès aux plates-formes aéroportuaires

La question des accès aux plates-formes aéroportuaires par les passagers et les salariés constitue un chantier à part entière. Le nombre de donneurs d'ordre impliqués (Etat, collectivités, autorités organisatrices des transports) et l'éclatement des décideurs finaux (100 millions de passagers par an sur une année normale, pré-Covid, à Paris, et plus de 120 000 emplois directs) rendent le sujet particulièrement complexe. L'amélioration de l'accessibilité en transports en commun constitue la priorité absolue, pour l'ensemble des sites. L'arrivée prochaine des lignes 14 et 18 du Grand Paris Express à Paris-Orly, du CDG Express, de la ligne 17 et de plusieurs lignes de bus à haut niveau de service à Paris-Charles de Gaulle et à Paris-Le Bourget permettra des progrès significatifs, même s'ils ne suffiront pas à eux seuls. Groupe ADP travaille par ailleurs sur le déploiement des mobilités bas carbone (437 points de recharge pour véhicules électriques fin 2020, en forte augmentation jusqu'en 2025) et sur la transformation des usages (développement du co-voiturage et des mobilités actives).

Les avions

La décarbonation des opérations avion au sol est en soi un projet essentiel et nécessitera des investissements non négligeables : l'électrification des aéroports et le renforcement de la puissance des réseaux qu'elle implique, devient un enjeu essentiel de la décennie qui s'ouvre. Pourtant elle n'effleure qu'à peine l'éléphant au milieu de la pièce : les émissions des avions en vol.

L'ensemble des aéroports de Groupe ADP ont rédigé et signé début 2021 une charte fixant un nouveau niveau d'ambition pour les aéroports, la charte *Airports for Trust*. Le message principal de cette charte met au cœur des préoccupations du groupe les émissions des avions en vol, qui représentent près de 85 % des émissions totales des plates-formes franciliennes au sens du scope 3 du GHG Protocol. Groupe ADP est en effet convaincu que les exploitants aéroportuaires ont un rôle majeur à jouer pour rendre possible l'avènement d'une aviation européenne zéro CO₂ d'ici 2050.

En février 2021, a été publiée l'étude *Destination 2050*, feuille de route de l'industrie européenne du transport aérien pour la décarbonation complète de son activité à horizon 2050. Cette étude décrit précisément les leviers : amélioration des opérations, renouvellement des flottes, incorporation de carburants aéronautiques durables et déploiement des technologies de rupture (aviation électrique et hydrogène). Pour permettre l'atteinte de cette ambition, Groupe ADP doit transformer la gestion des



Ferme photovoltaïque à l'aéroport Paris-Charles de Gaulle. ©JM Jouanneux, Groupe ADP

flux énergétiques sur ses plates-formes et faciliter la mise à disposition, au meilleur coût possible, des carburants aéronautiques durables et de l'hydrogène. Cela suppose un travail avec de nouveaux acteurs, énergéticiens, constructeurs, dont la place devient de plus en plus centrale dans l'écosystème aéroportuaire. La mise en place d'un tel hub énergétique, complétée par l'amélioration de la correspondance fer-air et la substitution de l'avion par le train partout où cela est pertinent, constitue certainement les plus importants défis à relever pour la transition vers le modèle de l'aéroport durable de demain.

CONCILIER VOYAGES ET TRANSITION ÉCOLOGIQUE

Peut-on au final encore voler et est-il possible de concilier voyage et transition écologique ? Les solutions que le secteur aérien peut apporter pour construire un mode de vie à faible impact environnemental, qui ne soit pas régressif mais respectueux de l'aspiration de chacun à poursuivre sa découverte du monde, sont nombreuses. Si prises isolément elles sont insuffisantes, leur addition rend possible la transition du secteur. La baisse des émissions des installations aéroportuaires, la décarbonation des opérations au sol et des accès, la transition de l'aviation vers une mobilité sans recours à un combustible fossile, sont les briques majeures de la feuille de route collective.

L'essentiel est désormais de travailler sur les conditions de réussite de cette transition : la capacité du secteur à y investir, l'articulation avec les autres secteurs économiques pour s'assurer de la compatibilité des trajectoires de décarbonation, sont sans doute les principaux leviers que le secteur doit mobiliser pour atteindre ses ambitions.

Préserver la capacité à investir des aéroports

La capacité des aéroports à investir est encadrée en Europe par la régulation aéroportuaire, dont l'exercice est assuré en France par l'Autorité de régulation des transports. Au regard des enjeux décrits ci-dessus, celle-ci doit être, de plus en plus, un outil au service de la transition

juste et durable de l'économie, dans l'esprit de ce qui est au fondement même de toute régulation : favoriser la génération d'externalités positives. Ceci suppose une capacité des aéroports à investir pour le moyen-long terme, au bénéfice non seulement de la qualité de service rendue aux passagers ou de la recherche d'amélioration de l'efficacité et la compétitivité des compagnies aériennes, mais aussi de la transition environnementale de l'ensemble du secteur et donc de la préservation de l'industrie et de l'emploi.

Veiller à maintenir la compétitivité et de justes conditions de concurrence

Bien sûr, les autres acteurs du secteur (compagnies, constructeurs) font également face à des besoins d'investissement importants, pour l'achat de carburants aéronautiques durables (4 à 10 fois le prix du kérosène fossile), le renouvellement des flottes et la recherche-développement pour les technologies de rupture notamment. Il est essentiel que, dans le cadre des nouvelles dispositions du paquet européen *Fit for 55* discutées à Bruxelles, de justes conditions de concurrence avec les compagnies et hubs extra européens soient assurées. Le maintien de la compétitivité des acteurs européens sera clé pour leur permettre de poursuivre les investissements dans la transition et éviter les fuites carbone. Au-delà, le secteur ne peut que se réjouir de l'engagement des pouvoirs publics français pour soutenir la recherche en vue de la commercialisation pour le milieu de la décennie 2030 du premier avion moyen-courrier zéro carbone, à propulsion hydrogène liquide. Ce projet constitue une opportunité unique, pour la France, de prendre le leadership de l'aviation verte de demain.

AGIR EN CONCERTATION

C'est désormais une certitude : aucun secteur ne peut envisager sa trajectoire de transition environnementale seul. La disponibilité en hydrogène bas carbone et en électricité, la répartition des ressources en biomasse, la création des infrastructures de transport de l'énergie à une échelle nationale et continentale, sont des préoccupations qui ne peuvent s'envisager que dans le cadre d'un dialogue inter-secteur apaisé et constructif, animé par les pouvoirs publics. Les acteurs du transport aérien ont désormais proposé en toute transparence leur vision de la transition, via notamment l'étude *Destination 2050*, pour rendre celle-ci possible.

Pour devenir de véritables plates-formes de connectivité bas carbone, les aéroports doivent investir non seulement pour réduire leurs émissions internes, mais aussi pour accompagner la décarbonation de leurs parties prenantes, au premier rang desquelles les autres acteurs du transport aérien. Ceci ne peut s'envisager que dans le cadre d'un partenariat entre acteurs publics et privés, reposant sur une vision commune des enjeux et des objectifs. ●

Un plan d'action d'ampleur internationale pour la décarbonation des aéroports

Aéroport de Las Americas en République dominicaine.

© Govin Sorel.



VINCI Airports a engagé un plan d'action d'ampleur internationale pour décarboner les aéroports qu'il exploite. L'objectif est triple : agir en pionnier de la transition environnementale dans son métier d'opérateur aéroportuaire, aider les compagnies aériennes et les passagers à se tourner vers des solutions plus durables et avoir un impact positif sur la décarbonation des territoires.

Entretien avec Joffrey Maï.



Joffrey Maï,
directeur Environnement
et Développement durable
VINCI Concessions

La décarbonation du transport aérien est aujourd'hui une priorité pour les acteurs de la filière. Quelles sont les étapes et les objectifs retenus par VINCI Airports pour concrétiser sa transition énergétique ?

Dans un contexte de développement international rapide de son activité, VINCI Airports a déployé dès 2016 un plan d'action environnemental sur tous ses aéroports. En 2019, ce plan a été renforcé autour de cinq objectifs concrets : la division par 2 de nos émissions CO₂ directes, la préservation de la biodiversité sur toutes les plateformes, l'atteinte du zéro déchet en décharge, la réduction de moitié des consommations en eau et l'obtention de la certification ISO 14001 sur l'ensemble du périmètre.

À l'occasion de la signature de la « Déclaration de Toulouse » en février 2022, lors du Sommet de l'aviation organisé par la présidence française du conseil de l'Union européenne, VINCI Airports s'est engagé sur de nouveaux objectifs : atteindre d'ici 2030, soit avec 20 ans d'avance sur la trajectoire de l'Accord de Paris, le « zéro émission nette de carbone » pour ses aéroports en Union européenne, et dès 2026 pour l'aéroport de Lyon-Saint Exupéry. Il deviendrait ainsi le premier aéroport d'aviation commerciale à atteindre la neutralité carbone en France.

Quels sont les axes d'action que vous mettez en œuvre pour la réussite de ces objectifs ?

La trajectoire de décarbonation de VINCI Airports repose sur l'amélioration de notre performance énergétique, le développement des énergies propres. Ces efforts ont permis de réduire de 28 % notre empreinte carbone directe sur l'ensemble du périmètre entre 2018 et 2021. En complément, nous développons la séquestration des émissions résiduelles par un programme de puits de carbone forestiers..

Nos aéroports sont également engagés dans le programme *Airport Carbon Accreditation* (ACA) de l'ACI. Parmi les 39 aéroports accrédités, 26 sont au niveau 2 et trois au niveau 4. Les aéroports de Londres Gatwick et Lyon-Saint Exupéry sont accrédités au niveau 3+, attestant de leur neutralité carbone.

La filière aérienne est constituée d'une multitude d'acteurs, dont font partie les aéroports. Par quels leviers pouvez-vous agir sur les autres acteurs et contribuer à faciliter leur transition énergétique ?

La décarbonation de l'ensemble de la chaîne de la mobilité aérienne est effectivement une préoccupation importante de VINCI Airports. Afin d'accompagner les compagnies aériennes, nous développons par exemple des solutions APU-off¹, alternatives à l'usage des moteurs auxiliaires de puissance des aéronefs. À l'aéroport international de Phnom Penh, en mai 2021, des unités d'alimentation en électricité et en air pré-conditionné fixes au sol sur les parkings des avions ont été installées, limitant ainsi les émissions polluantes, le CO₂ et le bruit.

La trajectoire de décarbonation de VINCI Airports repose sur l'amélioration de notre performance énergétique, le développement des énergies propres et la séquestration des émissions résiduelles par un programme de puits de carbone forestiers

Vous avez également un rôle clé dans le déploiement des carburants d'aviation durable (les SAF), grâce auxquels les compagnies aériennes vont pouvoir réduire leurs émissions. Quelle est votre politique pour en faciliter le déploiement ?

Les carburants d'aviation durables constituent une solution à impact positif immédiat pour accompagner la décarbonation de l'aviation. Nous avons participé à ce titre à l'appel à manifestation d'intérêt Biocarburants lancé par l'Etat en juillet 2020 pour développer l'adoption de ces biocarburants par les compagnies. La mise à disposition de biocarburants durables à l'aéroport de Clermont-Ferrand Auvergne depuis le 19 avril 2021 constitue une première en France, avec pour premier client Michelin Air Services. Durant la COP 26, l'aéroport de Londres Gatwick a lui aussi mobilisé les ressources nécessaires pour déployer les biocarburants en partenariat avec EasyJet.

Pour encourager l'utilisation des biocarburants d'aviation durables et le renouvellement des flottes en faveur de nouveaux modèles plus performants sur le plan énergétique, nous avons mis en place une modulation des redevances d'atterrissage pour que les avions dont le niveau d'émissions est le plus faible bénéficient de redevances réduites. Les aéroports de Grenoble et Chambéry ont mis en œuvre cette mesure le 1^{er} janvier 2021, puis ont suivi les aéroports de Clermont-Ferrand, Rennes, Dinard et Toulon depuis le 1^{er} avril 2021 et l'aéroport de Lyon-Saint Exupéry début 2022.

Au-delà du développement des SAF, nous participons au développement de l'hydrogène pour accélérer la décarbonation du secteur aérien. Nous nous sommes associés à Airbus et Air Liquide pour développer l'utilisation de l'hydrogène dans les aéroports et construire le réseau européen d'aéroports nécessaire pour accueillir les futurs avions à hydrogène. L'aéroport pilote de Lyon-Saint Exupéry accueillera les premières installations en 2023. L'objectif : faire des aéroports de véritables hubs aptes à servir les besoins en hydrogène renouvelable de l'ensemble de leur écosystème et de leur territoire.

...

1. Un APU (Auxiliary Power Unit) est un groupe auxiliaire de puissance (en général un turbogénérateur) destiné à produire de l'énergie à bord des avions pour alimenter au sol les différents systèmes de bord (tension électrique, pressions pneumatique et hydraulique, climatisation) quand les moteurs principaux sont à l'arrêt.



Panneaux solaires - Aéroport de République dominicaine. © GOVIN SOREL.



Aéroport de Lyon-Saint Exupéry. © Eric Soudan.

Comment favorisez-vous le déploiement de l'énergie décarbonée dans vos infrastructures ?

Pour décarboner l'énergie utilisée dans nos infrastructures, nous misons beaucoup sur le déploiement des énergies renouvelables. Nous déployons un vaste programme photovoltaïque, avec un total de près de 30 MWc déjà installés. Nous faisons aussi en sorte d'intégrer à cette stratégie les territoires sur lesquels se trouvent nos aéroports en réinjectant une partie de l'énergie renouvelable produite dans les réseaux.

Cette stratégie a notamment été mise en place en République dominicaine où, grâce aux installations déployées dans ses six aéroports dominicains, VINCI Airports dispose d'une production solaire de 6,8 MWc, la plus importante du pays. De futures centrales en injection réseau verront prochainement le jour à l'aéroport de Lyon Saint-Exupéry et de Stockholm Skavsta. Pour développer ces nouveaux projets nous travaillons avec SunMind, filiale de VINCI Concessions spécialisée dans la conception, le financement, la construction et la maintenance de centrales solaires.

La décarbonation passe aussi par une politique de déploiement de la mobilité électrique. Dans nos aéroports, le nombre de bornes de recharge électrique à disposition des usagers est ainsi passé de 92 en 2019 à plus de 200 en 2021.

Nous menons aussi une politique de gestion intelligente de l'énergie, à l'image de ce que nous avons fait à l'aéroport international du Kansai où nous avons mis en place un tableau de bord énergétique qui s'appuie sur un système de gestion de l'énergie du bâtiment associé aux données opérationnelles pour améliorer l'efficacité énergétique

des équipements et des infrastructures. Concrètement, ce système permet d'analyser les données des systèmes de climatisation et de chauffage de l'aéroport, en fonction des opérations et de l'activité, afin de réaliser des économies d'énergie.

Ces actions permettent à VINCI Airports de réduire ses émissions, mais pour celles qui n'ont pas pu être éliminées, que prévoyez-vous ?

En ce qui concerne les émissions résiduelles, VINCI Airports a mis en place en 2021 un nouveau programme de développement de puits de carbone forestiers. Situés au plus près de nos aéroports et gérés en partenariat avec les acteurs locaux, ces puits de carbone forestiers sont également une source de dynamisme pour l'industrie environnementale des territoires.

À l'aéroport de Lyon-Saint Exupéry, nous travaillons avec l'ONF et le département du Rhône autour de projets de puits de carbone forestiers bénéficiant du label Bas Carbone. Le premier projet de ce programme, se situe dans la forêt départementale de la Cantinière et consiste à restaurer, reboiser, entretenir et gérer une parcelle de 3,6 hectares avec des essences spécifiquement sélectionnées pour leur résilience et leur capacité d'absorption du CO₂. Le puits de carbone permettra d'absorber les 500 tonnes d'émissions résiduelles des aéroports de Lyon à l'horizon 2026.

Le programme a depuis été mis en place au Portugal, à proximité des aéroports de Faro, en Algarve, et de Porto Santo, dans l'archipel de Madère, en partenariat avec l'Institut pour la conservation de la nature et des forêts (l'équivalent de l'ONF au Portugal).



La forêt départementale de la Cantinière accueille le premier puits carbone forestier des aéroports de Lyon. © CD69-JULIEN BOURREAU.

Les questions de biodiversité et d'économie circulaire sont également au centre de vos activités. Quelle est votre stratégie pour répondre à ces enjeux et vous adapter aux circonstances spécifiques qui diffèrent évidemment d'un aéroport à un autre ?

Les aéroports sont implantés sur des espaces riches en faune et flore et c'est pourquoi nous nous engageons pour la protection des milieux naturels et de la biodiversité. Les aéroports du réseau sont engagés pour atteindre le zéro pesticide d'ici 2025 et ont d'ores et déjà réduit leur emploi de pesticides de 80 % entre 2018 et 2021. Enfin, la certification ISO 14001 se développe sur notre réseau, avec 23 aéroports déjà certifiés.

La mise en place d'une économie circulaire fait également partie de nos priorités avec l'objectif d'atteindre d'ici 2030 le zéro déchet en décharge, ce qui constitue un réel défi dans certains pays où les filières de valorisation et de recyclage ne sont pas entièrement structurées.

En République dominicaine, des centres de tri des déchets sur les aéroports ont été installés, fruit d'un partenariat signé entre Aerodom et Dominicana Limpia, une association locale qui souhaite promouvoir et accélérer le processus de valorisation et de tri des déchets en République Dominicaine.

À Salvador, au Brésil, les efforts déployés par l'aéroport en matière d'efficacité énergétique et de gestion des risques liés à la faune sauvage et la mise en place d'une station de traitement des effluents in situ permettent d'atteindre le zéro rejet liquide, grâce à la réutilisation de 100 % de l'eau traitée. De plus, un centre de tri des déchets a été implanté sur l'aéroport, permettant à la plate-forme d'atteindre l'objectif de zéro déchet en décharge. Il est prévu de répliquer cette approche dans les nouveaux aéroports brésiliens intégrés à notre réseau en 2022. ●

VINCI Airports en quelques chiffres

- **53 aéroports** dans **12 pays** et quatre continents
- **1^{er} opérateur aéroportuaire privé au monde**
- **1^{er} opérateur aéroportuaire à avoir mis en place une stratégie environnementale internationale**
- **15 000 collaborateurs** dans le monde
- **86 millions de passagers** en 2021
- **-28 % de réduction de l'empreinte carbone** dans nos aéroports depuis 2018
- **39 aéroports accrédités ACA** (Airport Carbon Accreditation)
- **38 % taux de valorisation de nos déchets** en 2021 sur le périmètre international
- **- 83 % de réduction d'usage de pesticides** entre 2021 et 2018
- **28,5 MWc de panneaux photovoltaïques** en autoconsommation et injection
- **objectifs pour 2030** (par rapport à 2018) :
 - - 50 % des émissions carbone (scope 1 et 2)
 - Zéro émission nette pour nos aéroports européens
 - - 50 % d'eau consommée
 - Zéro déchet en décharge
 - Zéro produit phytosanitaire

Les leviers technologiques de décarbonation de l'aviation



Métier à tisser la fibre de carbone en 3D.
© Adrien Daste (Safran).

Atteindre la neutralité carbone de l'aviation en 2050, est un défi technologique qui semblait, il y a encore moins d'une décennie, hors de portée. Aujourd'hui, le secteur aérien est prêt à le relever. Mais il n'existe pas de solution unique, c'est un ensemble de progrès qu'il faut réaliser dans plusieurs directions. Certains s'inscrivent dans le prolongement des avancées accomplies dans le passé. D'autres constituent de véritables ruptures technologiques.



Thibaud Normand,
directeur Climat, Safran

Le secteur aéronautique est engagé depuis sa création dans une recherche continue d'efficacité, afin d'apporter un service croissant de connectivité au plus grand nombre de personnes sur la planète. Ainsi, la consommation par passager.kilomètre des avions a-t-elle été divisée par deux dans les 30 dernières années. L'urgence du défi climatique impose toutefois une rupture majeure dans les progrès technologiques du secteur aérien, pour atteindre l'objectif de neutralité carbone en 2050 que le secteur aérien s'est donné. Engagés depuis plusieurs années dans cette démarche, Safran et les principaux acteurs du secteur aéronautique ont défini une feuille de route crédible pour la décarbonation de l'aviation, fondée sur trois grands leviers (figure 1) :

- améliorer fortement la performance énergétique des avions avec un objectif de réduction des émissions de 35 à 40 % ;
- assurer la transition vers différents carburants bas carbone dont on attend une réduction des émissions de 50 % environ ;
- améliorer l'efficacité des opérations avec objectif de réduction de 5 à 10 %).



AMÉLIORER FORTEMENT L'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE DES AVIONS

Dans le secteur aérien comme dans d'autres secteurs, améliorer l'efficacité énergétique constitue le premier levier d'une stratégie de décarbonation, pour réduire la pression sur les ressources et accompagner la transition vers des énergies décarbonées.

Le renouvellement des flottes par les avions de dernière génération est le levier le plus immédiat, et le principal à court terme, pour réduire la

consommation de l'aviation. Les avions court et moyen-courrier de dernière génération, mis en service à partir de 2016 (Airbus A220 et A320neo, Boeing 737MAX), apportent par exemple 15 % de gain sur les avions de génération précédente. À ce jour, ils représentent moins de 20 % de la flotte court et moyen-courrier.

Ce renouvellement s'inscrit dans un progrès continu de l'efficacité de la flotte en service ces dernières décennies, de l'ordre de 1,5 % par an. Atteindre la neutralité carbone d'ici 2050 suppose toutefois de préparer un saut technologique pour la prochaine génération •••

UN ENGAGEMENT AMBITIEUX POUR UNE NEUTRALITÉ CARBONE EN 2050

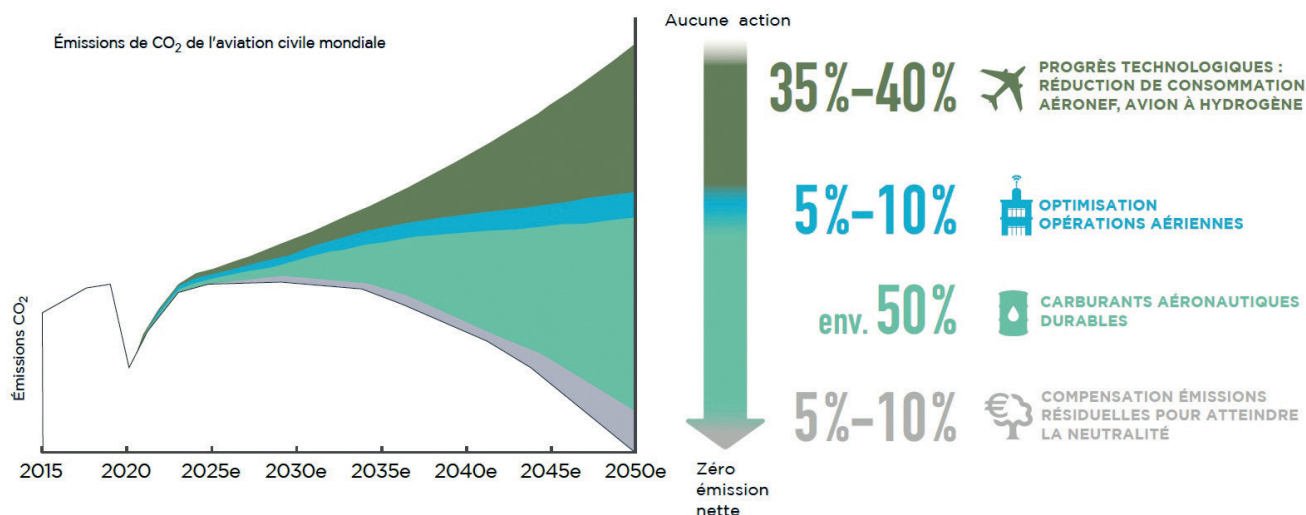


Fig. 1 : La vision de Safran sur la part des principaux leviers de décarbonation de l'aviation civile. © Safran.

Les facteurs d'amélioration de l'efficacité d'un turboréacteur :

L'amélioration de l'efficacité des turboréacteurs a principalement reposé, ces dernières décennies, sur deux principaux axes :

- d'une part, l'augmentation de la température de combustion, pour améliorer le rendement thermique. Les moteurs civils actuels parviennent à des températures de l'ordre de 1 500 °C, ce qui nécessite le recours à des alliages complexes et à des aubes de turbine refroidies par des flux d'air froid prélevés en amont ;
- d'autre part, l'architecture à double flux, avec un flux d'air primaire, qui traverse la chambre de combustion, et un flux d'air secondaire, qui passe uniquement par le premier étage de compression, c'est-à-dire la « soufflante » visible à l'avant du moteur. Apportant de la poussée sans subir de combustion, ce flux secondaire améliore l'efficacité du moteur. Le taux de dilution, qui mesure la proportion de ce flux secondaire, a ainsi régulièrement augmenté au cours du temps : sur le moteur LEAP, le flux secondaire est ainsi 10 fois plus important que le flux primaire qui subit la combustion. Cette évolution conduit à augmenter la taille du moteur et pose donc des défis importants, notamment concernant la masse et la vitesse des pales de la soufflante : c'est en réponse à ces défis que Safran a développé des aubes de

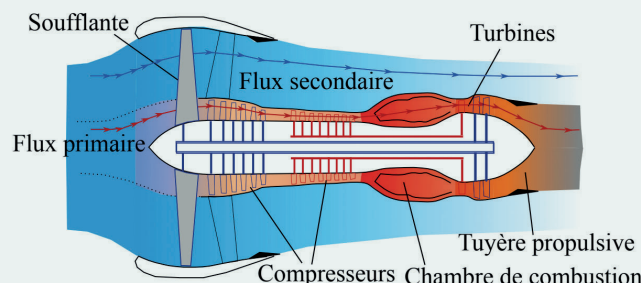


Figure 2 : Schéma en coupe présentant le principe de fonctionnement d'un turboréacteur à double flux. En sortie du moteur, le flux primaire est repéré par la flèche rouge tandis que le flux secondaire l'est par la flèche bleue.
Source : Référentiel ISAE-SUPAERO – Aviation et climat (septembre 2021).

soufflante en matériaux composites 3D, plus légères que le titane, ou que le motoriste Pratt&Whitney a développé une boîte de transmission (ou réducteur) afin de permettre une rotation plus lente de la soufflante.

Les progrès réalisés dans ces deux principales directions reposent en particulier sur les innovations dans le domaine des matériaux (plus résistants aux contraintes ou aux hautes températures, plus légers, etc.).

d'appareils qui seront mis en service dans la décennie 2030 et constitueront la majorité de la flotte au milieu du siècle. Safran considère que les futurs avions court et moyen-courrier, mis en service autour de 2035, pourraient apporter un gain de consommation énergétique de 30 % par passager.kilomètre, soit le double de la performance habituelle obtenue par une nouvelle génération d'aéronef. Atteindre une telle performance suppose de combiner l'ensemble des pistes d'amélioration technologique dans les différents domaines accessibles.

La motorisation

L'efficacité de la dernière génération d'avions court et moyen-courrier repose principalement sur l'amélioration des moteurs : le moteur LEAP de CFM International¹ apporte ainsi un gain de 15 % de consommation par rapport au moteur CFM56 qu'il remplace, notamment grâce aux progrès technologiques sur les matériaux et les procédés (matériaux composites, fabrication additive, alliages haute température, etc.), qui ont permis d'augmenter la température de combustion, d'améliorer l'efficacité

propulsive du moteur et de réduire la masse de ses composants.

Les futurs avions moyen et long-courrier resteront motorisés par des turbines à gaz, la propulsion électrique (à partir de batteries ou pile à combustible) n'étant pas assez performante au-delà de quelques centaines de kilomètres pour des avions de taille significative.

Pour franchir un nouveau saut en termes d'efficacité, Safran et son partenaire GE Aviation ont présenté en juin 2021 leur vision des futurs moteurs au travers du programme technologique RISE (*Revolutionary Innovation for Sustainable Engines*), qui vise un gain de consommation spécifique de 20 % à l'horizon 2035 par rapport au LEAP. Ce programme développera des innovations technologiques dans le prolongement des axes d'amélioration déjà connus (matériaux résistants aux hautes températures, utilisation d'un réducteur), mais aussi des technologies de rupture, en particulier l'hybridation électrique et l'architecture non carénée (figure 3).

L'hybridation électrique des moteurs pourrait permettre d'optimiser leur fonctionnement dans les différentes phases de vol, par exemple en apportant

de la puissance dans certaines phases critiques, afin de dimensionner le turboréacteur de manière plus optimale.

L'architecture non carénée pousse jusqu'au bout la logique d'une augmentation du taux de dilution, apportant un rendement propulsif maximal. En supprimant la nacelle du moteur, il devient possible d'augmenter fortement le diamètre de la soufflante sans problématique de masse ou de traînée de frottement. La soufflante explorée sur le programme RISE aurait ainsi un diamètre deux fois plus grand que celle du moteur LEAP. Cette architecture en rupture repose notamment sur des innovations pour maîtriser le bruit généré par le moteur. Elle supposera également un travail rapproché avec les avionneurs pour chercher les meilleures configurations aérodynamiques pour intégrer ce moteur sur l'avion, d'autres options que l'architecture actuelle des avions étant possibles (moteurs à l'arrière, moteurs sous ailes hautes, etc.).

L'aérodynamique

Outre le développement des *winglets*, appendices aérodynamiques en bout d'ailes déjà largement déployés sur la

1. Co-entreprise détenue à 50 % par Safran et 50 % par GE Aviation, leader mondial des moteurs d'avions court-moyen-courriers.

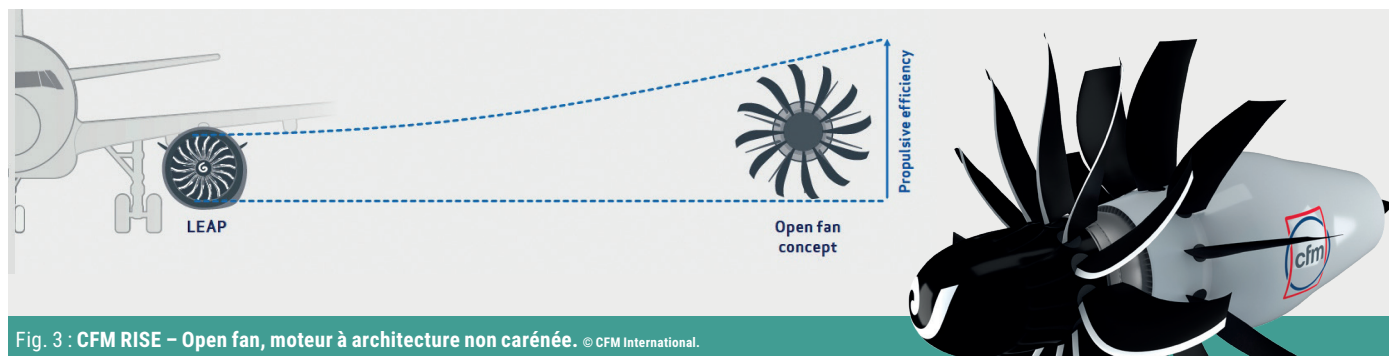


Fig. 3 : CFM RISE – Open fan, moteur à architecture non carénée. © CFM International.



Fabrication d'aubes de turbine par la méthode de fonderie à la cire perdue.
© Adrien Daste (Safran).

flotte existante, des progrès significatifs sont attendus grâce à l'allongement des ailes et l'optimisation de leur forme, voire leur contrôle actif en vol, afin de se rapprocher des caractéristiques d'un écoulement laminaire. Des évolutions d'architecture font également l'objet de travaux de recherche, comme les ailes hautes haubanées étudiées par la NASA.

L'allègement

Réduire la masse embarquée est un axe de progrès déjà largement développé ces dernières décennies, mais sur lequel un potentiel d'amélioration demeure. Il s'agit à la fois de réduire la masse des aérostructures grâce à l'emploi accru de composites (très développé sur les Boeing 787 et Airbus A350, mais peu utilisé sur les avions court et moyen-courrier actuels), et celles des systèmes embarqués : trains d'atterrissage, systèmes électriques, intérieurs de cabine (1 à 2 kg gagné par siège, entre deux générations soit environ 7 ans). Outre le recours à des matériaux plus légers (par exemple le titane, les matériaux composites), le développement accru de la fabrication additive devrait permettre de réduire la masse grâce à des géométries de pièces plus adaptées aux contraintes souhaitées.

L'électrification croissante des systèmes

Présent sur l'ensemble de la chaîne énergétique de l'avion, Safran identifie des gains significatifs liés à l'électrification progressive des avions, au-delà de l'hybridation de la propulsion. L'électrification des systèmes non-propulsifs (par exemple : actionneurs pour les inverseurs de poussée ou le déploiement des trains d'atterrissage, systèmes de dégivrage, voire air conditionné) permet de substituer des systèmes électriques aux systèmes hydrauliques, pneumatiques ou mécaniques, apportant souvent un allègement des réseaux et une optimisation des prélèvements énergétiques sur les moteurs.

ASSURER LA TRANSITION DU SECTEUR AÉRIEN VERS DES CARBURANTS BAS CARBONE

Voler suppose de disposer d'une quantité importante d'énergie disponible dans une masse limitée, ce qui explique que les batteries resteront probablement une option marginale pour l'aviation commerciale. Deux types de carburants,

davantage complémentaires que concurrents, sont identifiés pour décarboner l'aviation : les carburants durables à la formulation proche du kérosène, tels que les biocarburants ou carburants synthétiques, et l'hydrogène. Les questions relatives au coût de ces nouveaux carburants et à la concurrence d'accès aux ressources pour les produire (biomasse, électricité renouvelable) justifient l'importance d'une rupture en termes d'efficacité énergétique des avions. Cette rupture sera d'autant plus nécessaire pour l'hydrogène que le volume de carburant à embarquer sera le facteur principal pour dimensionner de ces avions.

Les biocarburants avancés et les carburants synthétiques

Les carburants durables liquides, incorporables en mélange avec le kérosène et à terme utilisés purs, constituent un levier de décarbonation incontournable pour réduire les émissions de la flotte en service et de la génération actuelle d'avions, et ils demeureront indispensables pour décarboner les vols long-courrier pour lesquels l'hydrogène n'est pas une solution optimale.

Il s'agit également d'un levier accessible immédiatement : les biocarburants avancés, qui apportent une réduction d'environ 80 % de CO₂ sur leur cycle de vie par rapport au kérosène, sont déjà matures. Sept filières de production sont certifiées pour l'utilisation en mélange avec le kérosène, des installations de production de biocarburants à partir d'huiles usagées sont en service et plusieurs filières arriveront au stade de la maturité industrielle dans les prochaines années. En complément des

...



Assemblage final de sièges de classe économique. © Frank Rogozinski/CAPA Pictures/Safran.

biocarburants avancés, les carburants synthétiques produits à partir d'hydrogène et de CO_2 récupéré devraient se développer fortement dans la décennie 2030.

Les freins au développement de ces carburants sont davantage liés à leur coût et à l'absence de réglementation incitative, qu'aux enjeux technologiques sur les avions et les moteurs : les avions en service peuvent ainsi déjà utiliser jusqu'à 50 % de carburants durables en mélange avec le kérosène.

Bien que ce seuil soit très loin d'être atteint, le secteur aéronautique travaille déjà sur les conditions permettant d'utiliser 100 % de carburant durable. Dans la mesure où les avions ont une longue durée de vie, la flotte en service en 2050 sera composée d'avions livrés à partir de la fin de la décennie actuelle. Les principaux avionneurs se sont ainsi engagés à livrer des avions compatibles avec 100 % de carburant durable d'ici 2030. Cet objectif ne présente pas de difficulté significative : il nécessite principalement des travaux d'adaptation de certains matériaux du système carburant, pour lesquels certains composants du kérosène contribuaient aux fonctions d'étanchéité.

Au-delà de la réduction des émissions de CO_2 sur leur cycle de vie, les carburants durables aériens pourraient

présenter un impact climatique favorable sur les effets hors- CO_2 ². Les biocarburants avancés contiennent moins d'aromatiques et leur combustion génère moins de particules de suie, qui sont des précurseurs des traînées de condensation.

L'année 2021 a vu des progrès importants dans ce domaine, avec en particulier plusieurs essais en vol réalisés par des acteurs industriels français avec le soutien de la DGAC. Un Airbus A319neo, équipé du moteur LEAP de Safran, a volé avec 100 % de carburants durables dans le cadre du projet VOLCAN qui doit permettre d'améliorer la connaissance des rejets associés à ces nouveaux carburants ainsi que leur impact sur les effets hors- CO_2 ³. Des démonstrations en vol d'hélicoptères ont également été réalisées.

L'hydrogène liquide

L'intérêt principal de recourir à l'hydrogène réside dans la possibilité d'atteindre zéro émission de CO_2 en vol. Deux voies technologiques permettent d'utiliser l'hydrogène pour la propulsion aérienne :

- les piles à combustible d'une part, qui posent des défis en terme de densité de puissance et de refroidissement, et ne paraissent adaptées qu'aux avions régionaux à moyen terme ;

- la combustion d'hydrogène dans des turbines à gaz relativement similaires aux moteurs actuels, pour les avions court et moyen-courrier qui constituent la majorité de la flotte d'avions commerciaux.

Les limitations liées aux caractéristiques intrinsèques de l'hydrogène liquide en font une solution technologique complémentaire aux biocarburants avancés et aux carburants de synthèse, davantage qu'une option concurrente : elle ne sera accessible que sur une nouvelle génération d'avions en rupture, à partir du milieu de la prochaine décennie, et pour un segment limité du transport aérien (liaisons régionales, avions court-courrier voire une partie du segment moyen-courriers).

L'emploi de l'hydrogène comme carburant présente des défis majeurs pour la filière aéronautique, en complément des enjeux associés à l'amont (production d'électricité décarbonée, approvisionnement des aéroports, coût, etc.). Si l'hydrogène est un vecteur énergétique trois fois plus « léger » que le kérosène⁴, il prend quatre fois plus de place à stocker lorsqu'il est à l'état liquide (et bien plus à l'état gazeux). Il est donc nécessaire de stocker l'hydrogène à l'état liquide, à -253 °C, dans des réservoirs bien plus volumineux que ceux du kérosène, dont la géométrie particulière (sphérique/

2. Le lecteur pourra se reporter sur ce point à l'article de Jérôme Fontane et Florian Simatos « les effets non CO_2 : l'autre impact climatique de l'aviation ».

3. Les effets hors- CO_2 correspondent à l'impact climatique généré par les rejets en altitude de NO_x et par les traînées de condensation.

cylindrique) imposera une intégration dans le fuselage plutôt que les ailes et dont la masse et le volume limiteront la taille des avions à hydrogène. Outre ce changement d'architecture, la gestion du comportement thermodynamique de l'hydrogène du réservoir jusqu'au moteur constitue un défi technologique et présente des enjeux de sécurité liés aux risques de fuite et à la forte inflammabilité de ce carburant. Enfin, il sera nécessaire de qualifier l'impact climatique global de la combustion d'hydrogène, en tenant compte de l'effet des rejets aqueux sur la formation des traînées de condensation, ce qui nécessitera des essais en vol.

Ces défis technologiques font actuellement l'objet de projets de recherche soutenus par les pouvoirs publics français, notamment le projet HYPERION associant Safran, Airbus et ArianeGroup pour définir l'architecture des futurs systèmes de propulsion à hydrogène et le projet CirrusH2 visant à qualifier l'impact de ces aéronefs sur les traînées de condensation.

AMÉLIORER L'EFFICACITÉ DES OPÉRATIONS AÉRIENNES ET AU SOL

En complément des améliorations technologiques sur l'avion et de l'évolution vers des carburants bas carbone, un ensemble de leviers relatifs aux opérations pourrait apporter 5 à 10 % d'efficacité supplémentaire d'ici le milieu du siècle : roulage électrique au sol (e-taxi), recours à des trajectoires plus directes grâce à une gestion dynamique du trafic aérien, montée et descente continues, etc. Si les innovations technologiques associées sont bien identifiées, ces leviers de décarbonation reposent également sur des évolutions organisationnelles importantes du contrôle aérien dans les prochaines années⁵.



EN CONCLUSION : UN EFFORT D'INNOVATION SANS PRÉCÉDENT EST NÉCESSAIRE POUR RELEVER LE DÉFI CLIMATIQUE

Fort d'une longue tradition de recherche de performance, le secteur aérien dispose d'une feuille de route crédible pour sa décarbonation, fondée sur de nombreux leviers technologiques. Ensemble, ces améliorations permettront de réduire les émissions par passager.kilomètre de l'ordre de 90 % en 2050 par rapport à 2005, pour contribuer à l'atteinte de la neutralité carbone.

D'avantage qu'un enjeu de faisabilité technique de telle ou telle solution, le défi qui s'impose à l'ensemble du secteur est d'accélérer l'entrée en service de chaque innovation et de réunir l'ensemble dans une prochaine génération d'avions qui constitue une véritable rupture. Face à l'urgence climatique, le Groupe Safran, ses salariés et plus largement l'ensemble de la filière aéronautique sont mobilisés en ce sens. ●

Premier vol d'un hélicoptère de secours avec du carburant aérien durable.

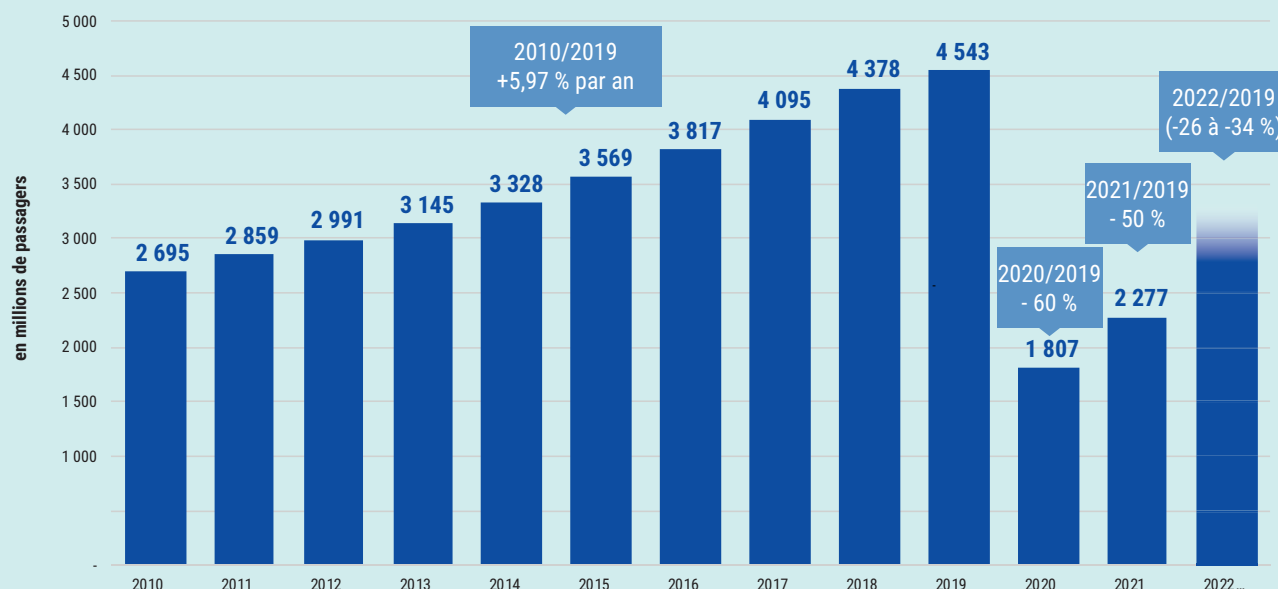
© ADAC Luftrettung/ Theo Klein.

4. La densité massique d'énergie de l'hydrogène est trois fois supérieure à celle du kérosène, mais sa densité volumique d'énergie quatre fois inférieure.
5. Le lecteur pourra se reporter sur cette question à l'article d'Amélie Lummaux : « Les aéroports : catalyseurs du transport aérien bas carbone ».

Quelques chiffres clés sur l'aviation



La reprise du trafic est progressive mais pourrait s'accélérer



Évolution du trafic aérien dans le monde.

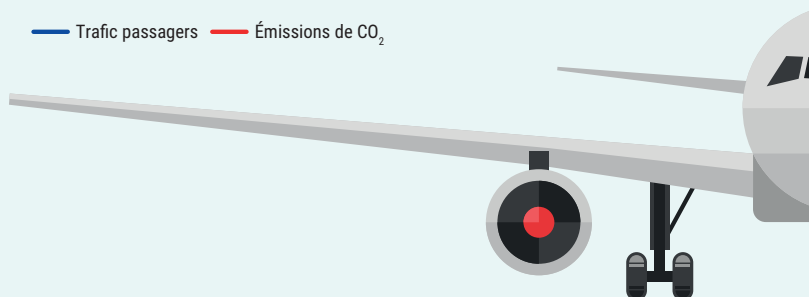
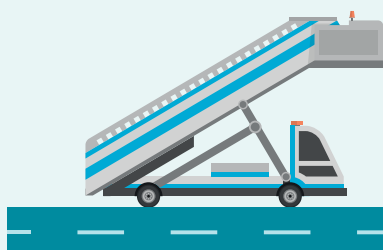
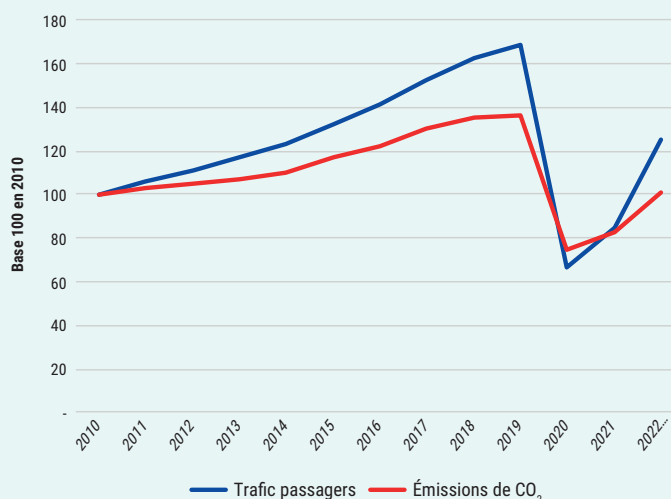
Source : Données OACI (estimations de début d'année pour 2022).

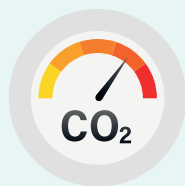


Les émissions de CO₂ du transport aérien augmentent en moyenne presque moitié moins vite que le nombre de passagers transportés

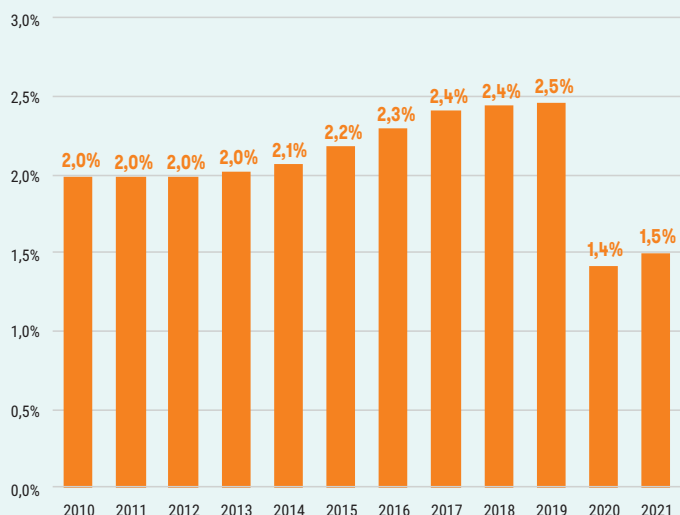
Évolution comparée du trafic de passagers aériens et des émissions de CO₂ du secteur aérien dans le monde.

Source : Données Statista.





La part des émissions de CO₂ dues au transport aérien croît régulièrement, malgré les progrès techniques accomplis, mais reste minime

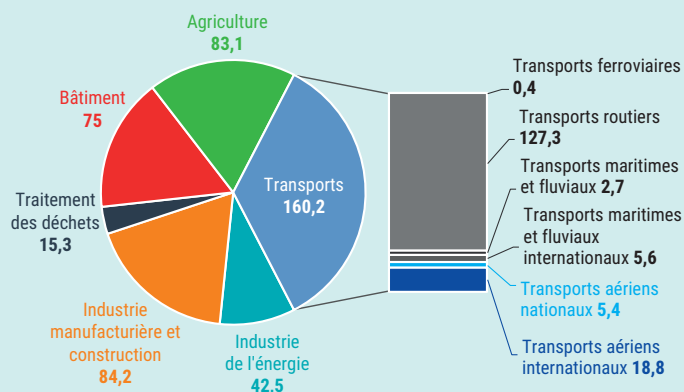


Évolution de la part des émissions du secteur aérien dans les émissions totales de CO₂ dans le monde.

Source : Données Statista.



En France, le poids du transport aérien dans les émissions totales de gaz à effet de serre n'excède pas quelques %, même en prenant en compte le trafic international



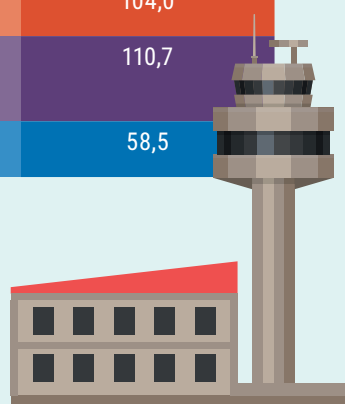
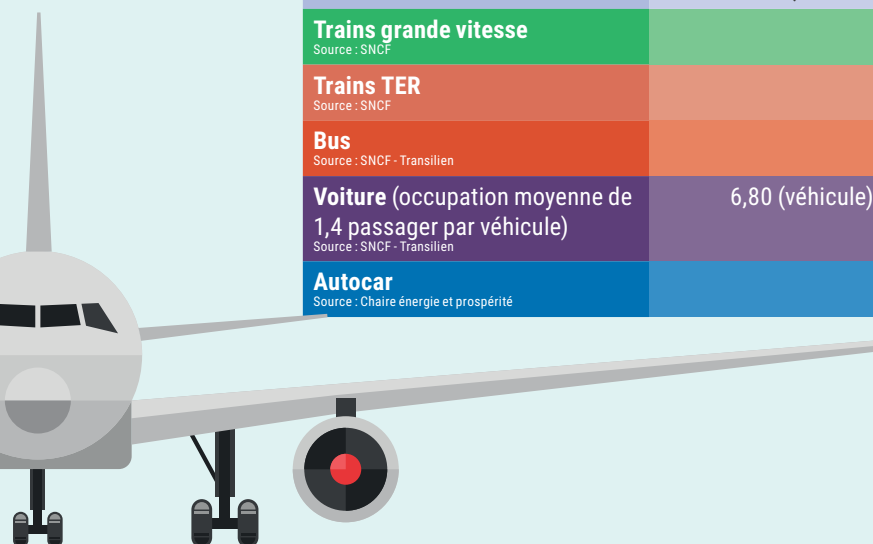
Répartition des émissions de gaz à effet de serre en France en 2019 (en Mt de CO₂e), y compris transports internationaux.

Source : Données CITEPA-Secten.

Le train est le mode de transport le moins émissif, lorsqu'il est accessible, mais le transport aérien se positionne bien et continuera à progresser

	Consommation de carburant par passager en l/100 km	Émissions de CO ₂ par passager en g/km
Avion Source : Calculateur en ligne Air France		
Paris-Brest	3,81	95,0
Paris-Nice	3,64	91,0
Paris-Madrid	3,76	94,0
Paris-New York	3,13	78,0
Paris-Pékin	3,00	75,0
Trains grande vitesse Source : SNCF		1,7
Trains TER Source : SNCF		24,8
Bus Source : SNCF - Transilien		104,0
Voiture (occupation moyenne de 1,4 passager par véhicule) Source : SNCF - Transilien	6,80 (véhicule)	110,7
Autocar Source : Chaire énergie et prospérité		58,5

OBJECTIF 2030 :
moins de 3 l/100 km par passager pour tout le groupe Air France-KLM



Éclairages, analyses, débats,
interviews d'acteurs clés
de la transition énergétique et
écologique, rendez-vous toute
l'année sur
equilibredesenergies.org

EdEn+ - Hors-série spécial aérien du périodique **EdEnmag** - Juin 2022

Le magazine de l'association loi de 1901 Équilibre des Énergies.

10, rue Jean-Goujon 75008 Paris - info@equilibredesenergies.org - Tél. : +33 1 53 20 13 70. Président : Brice Lalonde.

Directeur de la publication : Gilles Rogers-Boutbien. Rédacteur en chef : Jean-Pierre Hauet.

Comité éditorial : Luc Baranger, Étienne Beeker, Laurence Boulon, Cecil Coulet, Xavier de Cuverville, Jean-Baptiste Galland, Pierre Illenberger, Olivier Lagrange, Marilyne Martin.

Conception graphique : GAYA - Crédits photo : AdobeStock.

Impression : Graph 2000 - 82, av. du 85° de Ligne - 58200 Cosne-sur-Loire.

Imprimé sur papier certifié PEFC.

N° ISSN : **2558-4383**. Tirage : 3 670 exemplaires.



HORS-SÉRIE SPÉCIAL AÉRIEN

Retrouvez le magazine et toute notre actualité sur
equilibredesenergies.org