

DÉCARBONER LE SECTEUR AÉRIEN

TRANSPORTS

DANS LE CADRE DE NOTRE
PLAN ROBUSTE POUR L'ECONOMIE FRANCAISE



Introduction

Le secteur aérien représente aujourd'hui **2 à 3 % des émissions mondiales de CO₂** et **6,8 % des émissions françaises**, principalement en lien avec la combustion de kérosène fossile. A cela s'ajoutent les effets dit « hors-CO₂ », tel que l'effet réchauffant induit par les trainées de condensation des avions. Après la brève parenthèse du COVID et la forte baisse de trafic aérien qui l'a accompagnée, celui-ci a retrouvé son niveau d'avant la pandémie. Il croît aujourd'hui à un rythme soutenu, d'environ **+3,5 % par an**, une croissance dont la poursuite nous conduirait à un doublement du trafic à l'horizon 2050, et à un doublement des émissions toute chose égale par ailleurs.

Plusieurs **leviers complémentaires**, technologiques et organisationnels, peuvent permettre de diminuer l'impact climatique du secteur. Certains acteurs évoquent des innovations de rupture, **avion électrique** ou **avion à hydrogène**, permettant de se passer des hydrocarbures. De plus, des progrès tendanciels sont régulièrement implémentés pour **améliorer l'efficacité des avions**, notamment en les allégeant et en diminuant la consommation des moteurs. Par ailleurs, les **carburants durables**, biocarburants d'une part et carburants de synthèse d'autre part, peuvent permettre de décarboner le kérosène utilisé. Enfin, un recours à la sobriété, autrement dit une **baisse du trafic**, permettrait de réduire directement les émissions en proportion. Nous allons ici aborder ces leviers l'un après l'autre, afin d'en décrire les enjeux, d'en présenter les intérêts, et d'en cerner les limites.

Ruptures technologiques : poursuivre la R&D sans miser dessus à 2050

Si l'électrification est une priorité pour les transports terrestres⁵², elle est en revanche bien plus délicate pour le transport aérien. En effet, lorsqu'il s'agit de s'envoler, toute masse excessive est rédhibitoire. Or les technologies de batteries actuelles sont bien trop lourdes : la densité énergétique (la quantité d'énergie stockée par unité de masse) d'une batterie de voiture Tesla est près de 50 fois plus faible que celle du kérosène [64]. Même en considérant les toutes dernières technologies à date, il reste un facteur d'environ 25 à combler [65].

En revanche, alimenter des moteurs électriques par des piles à combustible consommant de l'hydrogène, ou adapter les moteurs d'avion à la combustion d'hydrogène, sont des solutions technologiques envisageables dès aujourd'hui dans leur principe ; cependant, elles soulèvent leur lot de questions techniques, industrielles et logistiques. L'hydrogène liquide prend environ quatre fois plus de place que le kérosène, pour un même contenu énergétique, d'où une autonomie bien plus faible pour une taille de réservoir donnée : utiliser l'hydrogène est donc aujourd'hui imaginable seulement pour des courts ou moyen-courriers. Le développement d'un tel avion est par ailleurs un défi technique de taille, qu'il s'agisse de son système propulsif ou du stockage et de la distribution de l'hydrogène à bord, ainsi que des impacts sur la conception générale. Un temps porté par Airbus, les principaux projets en la matière ont été repoussés sans nouvelle échéance [66], et le motoriste français Safran Aircraft Engines semble ne plus y croire [67]. Quant à l'avionneur américain Boeing, il ne s'est jamais réellement positionné en faveur de cette option technologique [68]. Nous considérons pour notre part que le secteur

⁵² Voir Chantier n°3 : Généraliser la voiture électrique sobre et Chantier n°7 : Electrifier les poids lourds

devrait poursuivre les efforts de recherche et développement sur cette solution, certes complexe et limitée, mais néanmoins intéressante pour ses bénéfices en termes d'émissions de CO₂ mais aussi, potentiellement, en termes d'effets hors-CO₂. Toujours est-il qu'en l'état **l'avion à hydrogène ne jouera aucun rôle significatif à l'horizon 2050**, compte tenu des durées de développement, de certification (qui plus est pour une technologie aussi innovante) et enfin de diffusion dans les flottes ; à quoi s'ajoute le défi logistique et infrastructurel pour des aéroports et des compagnies aériennes, qui devraient mettre en place des solutions d'approvisionnement et de stockage d'hydrogène.

Efficacité : des progrès attendus significatifs mais limités

En parallèle du travail de recherche sur les innovations de rupture, les acteurs du secteur implémentent depuis toujours de nombreux progrès incrémentaux, afin de réduire autant que possible la consommation de carburant des aéronefs. Les avionneurs travaillent ainsi à alléger autant que possible leurs appareils, en ayant notamment recours à des matériaux composites, plus légers. Les motoristes améliorent également leurs produits d'une génération sur l'autre : les moteurs CFM⁵³ actuellement installés sur les Airbus A320neo et les Boeing 737 max (moteurs Leap) consomment environ 15 % de carburant de moins que leurs prédécesseurs (moteurs CFM56)⁵⁴. Toutefois ces progrès d'efficacité se font de plus en plus difficiles avec le temps [69] : les améliorations les plus simples ont déjà été implémentées, et pour aller plus loin il faut désormais de **véritables bonds technologiques**, plus complexes et plus incertains.

Ainsi, un motoriste comme Safran Aircraft Engines travaille aujourd'hui sur une architecture innovante dite **Open Fan** (via le projet RISE), la seule qui soit en mesure de permettre des réductions massives de consommation carburant, de l'ordre de 20 % par rapports aux moteurs actuels (moteurs Leap). Ce moteur a vocation à équiper le successeur de l'A320neo d'Airbus [70] et pourrait donc être déployé massivement dans les flottes futures. Son entrée en service n'est toutefois pas attendue avant 2035 – pour un projet ayant démarré au début des années 2020, soit une quinzaine d'années de développement et de certification⁵⁵. De plus, la flotte aérienne mondiale met environ 25 ans à se renouveler. **Si l'Open Fan entre réellement en service en 2035 il ne sera donc généralisé qu'à l'horizon 2060**. Et s'il a du retard, ce qui est fréquent pour des grands projets industriels de ce type, alors toute année de décalage réduira d'autant sa pertinence pour la nécessaire atteinte de la neutralité carbone en 2050. Il n'équipera de plus vraisemblablement pas toute la flotte mondiale de court et moyen-courriers, puisque l'autre acteur majeur du secteur, Boeing, ne prévoit pas de sitôt un successeur à son Boeing 737 max [71], et n'aura donc pas l'opportunité d'intégrer prochainement ce nouveau moteur moins énergivore.

Notons que ces progrès en matière d'efficacité, certes nécessaires, sont loin d'être suffisants à contexte inchangé. Ainsi, **un gain unitaire de 20 % sur la consommation de chaque appareil serait totalement effacé par la hausse du trafic en seulement 6 à 7 années**, au rythme actuel de +3% par an. Par ailleurs, ces gains d'efficacité pourraient stimuler encore davantage la hausse du trafic, via la baisse de prix du billet qu'ils permettent grâce aux économies de carburant. C'est le principe de **l'effet rebond**, tel qu'il a été observé ces dernières décennies : entre 1973 et 2018, l'énergie nécessaire au transport d'un passager sur

⁵³ CFM est un consortium entre l'américain General Electric et le français Safran Aircraft Engines.

⁵⁴ CP, Le CFM LEAP réduit de 15% la consommation de carburant, Air & Cosmos [en ligne], publié le 21 juin 2023.

⁵⁵ Pour un projet certes innovant, mais largement moins en rupture qu'une technologie inédite comme l'avion électrique ou hydrogène, pour lesquels des délais plus importants encore seraient donc à redouter le cas échéant.

un kilomètre a été divisée par 5 grâce aux progrès techniques. Mais dans le même temps le trafic était multiplié par un facteur 13, notamment en raison de la chute des prix permis par ces mêmes progrès, conduisant au total à un quasi-triplement des émissions du secteur sur la période [72].

SAF : un déploiement à promouvoir mais des gisements contraints⁵⁶

Définition & intérêt

Les **SAF**, de l'acronyme anglais Sustainable Aviation Fuel, ou Carburants d'Aviation Durables, sont regroupés en deux catégories : les bioSAF et les e-SAF. Les **bioSAF** sont des biocarburants, produits à partir de biomasse. Les **e-SAF** sont des carburants de synthèse, produits à partir d'hydrogène bas-carbone - généré par électrolyse de l'eau avec de l'électricité bas-carbone⁵⁷, et de CO₂ capturé dans l'air ambiant ou en sortie d'un procédé industriel.

La composition chimique de ces SAF est très proche de celle du kérosène fossile, leur combustion émet donc également du CO₂. En revanche, contrairement au kérosène fossile, le carbone en question n'a pas été extrait de nos sous-sols : il provient de l'atmosphère après capture par la photosynthèse (bioSAF) ou via un procédé industriel (e-SAF), et ne fait donc qu'y retourner ; **une opération neutre** au premier ordre. Le bilan climatique réel de l'opération est toutefois fortement dépendant des conditions de production des SAF [73]. Un bioSAF réalisé à partir de cultures dédiées ayant occasionné des émissions agricoles importantes et/ou ayant généré de la déforestation, ou un e-SAF produit à partir d'un mix électrique fortement carboné car basé sur des centrales au charbon et au gaz, peuvent avoir un bilan carbone encore pire – voire bien pire – que le kérosène fossile. En revanche, un **bioSAF issu de biomasse résiduelle durable** (huile usagée ou déchets bois par exemple) ou un **e-SAF issu d'un mix électrique bas-carbone** (comme le mix français) présentent généralement un **fort gain climatique** par rapport au kérosène fossile. Il faut également noter que la combustion des SAF est généralement plus propre que celle du kérosène fossile, avec moins d'émissions de composés soufrés et de suies, ce qui constitue un bénéfice en termes de qualité de l'air et, potentiellement, également en terme climatique.

En outre, **un intérêt majeur des SAF est leur caractère « drop-in »** : ils peuvent être utilisés dans les moteurs existants⁵⁸, et ne sont donc pas tributaires des délais de développement, de certification et de renouvellement des flottes précédemment évoquées pour les solutions impliquant un changement d'appareil. C'est donc un **levier technologique crucial pour décarboner rapidement le secteur aérien**.

Des voies de production aux maturités variables

Différents procédés permettent de produire des SAF à partir de ressources variées [73]. Les **bioSAF** peuvent être produits par la voie **HEFA**⁵⁹, à partir d'huile, par la voie **AtJ**⁶⁰, à partir

⁵⁶ Cette partie s'appuie fortement sur le rapport AERO-DECARBO et THE SHIFT PROJECT, *Pouvoir voler sans pétrole : quel approvisionnement énergétique pour le secteur aérien ?* [73].

⁵⁷ Voir Chantier n°12 : Massifier la production d'hydrogène bas-carbone

⁵⁸ Aujourd'hui un moteur existant peut fonctionner avec jusqu'à 50 % de SAF. Il est prévu de certifier prochainement des moteurs pouvant fonctionner avec du 100 % SAF. Aujourd'hui la consommation totale de SAF est embryonnaire, moins de 1% du total, la technologie des moteurs ne limite donc pas (et ne limitera vraisemblablement pas à l'avenir) le déploiement – même très rapide – des SAF.

⁵⁹ Hydroprocessed Esters and Fatty Acids

⁶⁰ Alcohol-To-Jet

d'alcool, ou encore par la voie **BtL**⁶¹, à partir de biomasse lignocellulosique⁶². Les **e-SAF** sont produits par les voies **PtL**⁶³ ou **MtJ**, à partir d'hydrogène bas-carbone, et de CO₂ capturé. Il existe également des **e-bioSAF**, produits par la voie **PBtL**, à partir de biomasse lignocellulosique et d'hydrogène bas-carbone – l'apport d'hydrogène permettant d'exploiter au mieux le carbone contenu dans la biomasse.

Toutes ces voies n'ont pas la même maturité et ne possèdent pas le même potentiel de déploiement [73]. **La voie HEFA est actuellement la seule filière développée à l'échelle industrielle.** Mais elle s'appuie sur un **gisement limité**, les huiles et graisses usagées, dont le potentiel total devrait être atteint d'ici la fin de la décennie. L'AtJ est quant à lui relativement émissif et cher, ce qui le rend peu susceptible de se développer massivement. **Un déploiement significatif des SAF ne pourra donc s'appuyer que sur le BtL, le PBtL et PtL.** Or ces filières sont aujourd'hui balbutiantes sur le plan industriel : tout reste à faire en la matière.

Une filière à construire

La **montée en puissance** des SAF nécessitera un cadre adapté. La demande ne se déploiera pas d'elle-même, ces carburants étant bien plus onéreux que leur équivalent fossile – et voués à le rester dans la durée. Pour stimuler l'essor des SAF, la **réglementation européenne RefuelEU** impose des « taux d'incorporation » aux acteurs du secteur, c'est-à-dire de consommer un certain pourcentage de SAF sur leur volume total de consommation de carburant. Entrée en vigueur en 2025 avec un taux modeste de 2 %, cette obligation doit suivre une trajectoire croissante, jusqu'à imposer 70 % de SAF en 2050, dont la moitié de e-SAF. Aujourd'hui remise en cause par certains [74], **cette réglementation doit impérativement être maintenue** : en garantissant des débouchés significatifs dans la durée, elle donne aux énergéticiens une visibilité forte, nécessaire aux importants investissements initiaux que requiert la construction de sites de production de SAF.

Des gisements limités

Toutefois, **les SAF seront fortement contraints dans leur déploiement** par le caractère limité des gisements sur lesquels ils reposent. Les **bioSAF dépendent de la disponibilité en biomasse durable**, une ressource rare convoitée par de nombreux usages : alimentation humaine et animale, fertilité des sols, puits et stock de carbone⁶⁴, biodiversité, produits bois et bioénergies⁶⁵. De plus, plusieurs secteurs difficiles à décarboner misent fortement sur ces bioénergies : aérien certes, mais également maritime, transport routier lourd⁶⁶, machines agricoles ou encore engins de chantiers. L'aérien n'aura pas donc pas nécessairement accès à toute la biomasse nécessaire pour décarboner un trafic en forte croissance, sauf à nuire à d'autres usages essentiels, ou à freiner la décarbonation des autres secteurs demandeurs. Quant à eux, **les e-SAF dépendent, entre autres, de la ressource en électricité bas-**

⁶¹ Biomass-To-Liquid

⁶² C'est-à-dire boisée ou fibreuse

⁶³ Power-To-Liquid

⁶⁴ Voir Chapitre n°19 : Préserver et étendre les puits de carbone naturels, agricoles et forestiers

⁶⁵ Voir Chapitre n°18 : Déployer les bioénergies de manière soutenable

⁶⁶ Mais si le fret routier doit à notre sens être principalement décarboné via un report modal vers le fer et via une électrification des camions, lire nos deux chantiers dédiés.

carbone⁶⁷, car le rendement de leurs procédés de production – typiquement électrolyse de l'eau – est faible.

*NB : Notons toutefois que ces deux contraintes ne sont pas de même nature : le gisement de biomasse durable est une **limite « forte »**, physique, alors que la limite en électricité bas-carbone est une **limite « faible »**, industrielle, qui peut être partiellement repoussée en déployant davantage de moyens de production électriques bas-carbone. Cependant, les perspectives de déploiement en question n'étant pas illimitées⁶⁸ et les besoins en électricité bas-carbone étant nombreux⁶⁹, les tensions sur l'accès à l'électricité bas-carbone pourraient bel et bien s'avérer bloquantes dans la pratique.*

Au niveau mondial, remplacer l'ensemble de la consommation actuelle de kérosène fossile par des e-SAF nécessiterait environ 10 000 TWh, soit le **tiers de la production d'électricité mondiale** [73]. Au niveau français, en fléchant vers les bioSAF toute la biomasse réglementairement éligible et techniquement exploitable, et en fléchant vers les e-SAF **20 % de toute la production électrique française actuelle** – soit 110 TWh d'électricité bas-carbone –, on obtiendrait environ 5,6 millions de tonnes de SAF, ce qui **ne suffirait même pas à couvrir tout le kérosène fossile actuellement consommée** dans notre pays (7,3 millions de tonnes) [73].

Le constat est *in fine* sans appel : **pour décarboner le secteur aérien, les SAF seront nécessaires, mais ne seront pas suffisants**. Il va également falloir maîtriser notre consommation de carburant et donc (les progrès d'efficacité étant limités, comme expliqué plus haut) maîtriser le niveau du trafic aérien. Une **mobilisation massive mais réellement durable des SAF**, à hauteur par exemple de 30 % du gisement biomasse concerné et de 70 TWh d'électricité bas-carbone, nécessiterait par exemple une **réduction du trafic aérien français d'environ 30 %** pour que le secteur fasse sa part – au prorata de ses émissions actuelles dans l'atteinte de la neutralité carbone du pays [73].

Sobriété : l'impérative maîtrise du trafic

Cette maîtrise du trafic aérien français peut s'effectuer via plusieurs leviers complémentaires. Elle peut passer par le **signal-prix**, par exemple en revenant sur les exonérations de TVA dont bénéficie aujourd'hui le kérosène - taux réduit sur les vols domestiques et nul à l'international, ou en augmentant la taxe sur les billets d'avion (TSBA). Une taxation progressive pourrait également être imaginée, qui irait crescendo en fonction du nombre de vols effectués par chaque passager, et de leur distance⁷⁰. La limitation du trafic peut aussi prendre la forme de **quotas**, contraignant directement le trafic lui-même : limitation du nombre de vols autorisés par an dans chaque aéroport, quota de carburant fossile par compagnie aérienne, ou encore quotas individuels, en nombre de vols ou en kilomètres. Il est aussi possible de procéder à des **fermetures de lignes** aériennes, notamment lorsqu'il existe une alternative ferroviaire acceptable⁷¹. Il importe dès aujourd'hui de ne pas étendre l'offre aéroportuaire existante, **en**

⁶⁷ Ils dépendent aussi de la ressource en eau (pour la production d'H₂ par électrolyse de l'eau) ainsi que de la ressource en CO₂ (ce CO₂ devant être d'origine biogénique pour que le SAF soit réellement vertueux sur le plan climatique).

⁶⁸ Voir Chantier n°16 : Développer l'éolien et le photovoltaïque et Chantier n°17 : Prolonger le nucléaire historique, lancer le nouveau nucléaire

⁶⁹ Voir par exemple nos chantiers sur la voiture électrique, le camion électrique, les pompes à chaleur, l'acier bas-carbone ou encore l'hydrogène bas-carbone

⁷⁰ C'est l'idée de la taxe dite « grands voyageurs » portée par le Réseau Action Climat.

⁷¹ Un tel dispositif existe aujourd'hui dans la loi, mais pourrait être étendu. L'article 145 de la loi n°2021-1104 a créé une interdiction d'exploiter des vols à l'intérieur du territoire français lorsque le trajet est également assuré par des services ferroviaires,

renonçant aux extensions d'aéroports actuellement envisagées. Enfin, il est crucial de veiller à la bonne information du public sur l'impact climatique de l'aérien et de limiter l'exposition à des « tentations » évitables, **en régulant la publicité pour les vols les plus émetteurs** – voire en l'interdisant. Notons, pour finir, que la maîtrise du trafic aérien domestique et régional reposera aussi sur la **massification des alternatives ferroviaires, en particulier à l'échelle européenne**, qui devront être aussi abondantes, accessibles, abordables et fiables que possible⁷².

Conclusion

Une décarbonation rapide de l'aérien français ne peut pas miser sur des innovations telles que l'**avion à hydrogène, qui ne jouera pas de rôle significatif avant 2050**, même si la R&D en la matière doit être poursuivie. Les **progrès en termes d'efficacité énergétique** des appareils sont pour leur part **réels mais limités** : ils doivent être poursuivis, mais ils ne contrebalancent pas la hausse tendancielle du trafic et la stimulent même (toute chose égale par ailleurs) lorsqu'ils entraînent une baisse sur le prix des billets. Les **SAF constituent une option intéressante** car ils permettent de fortes baisses d'émissions – à condition d'avoir été produits de manière bas carbone – et peuvent être incorporés directement dans les appareils existants. Il faut donc **permettre la structuration et la montée en puissance d'une véritable filière industrielle française de production de SAF, réellement durables**. Le déploiement de ces carburants sera cependant **contraint par la disponibilité des ressources en biomasse durable et en électricité bas-carbone** : l'aérien n'en aura pas assez pour se décarboner suffisamment à croissance du trafic inchangé. Le **niveau du trafic aérien français doit donc être significativement réduit**, en utilisant tout ou partie des outils pour ce faire.

Contact

Clément Caudron

Chef de projet Transition Robuste

clement.caudron@theshiftproject.org

Héloïse Lesimple

Pilote communication et affaires publiques Transition Robuste

heloise.lesimple@theshiftproject.org

www.theshiftproject.org

sans correspondance et par plusieurs liaisons quotidiennes, en moins de 2h30. Cependant, le nombre de vols concernés est restreint. A titre de comparaison, la Convention Citoyenne pour le Climat proposait en 2019 une telle interdiction lorsque des alternatives existaient à moins de 4h en train, englobant un nombre plus large de vols.

⁷² Voir Chantier n°4 : Massifier le train passagers