

La décarbonation du secteur aérien au défi de l'accès à l'énergie décarbonée

Par Thibaud NORMAND

Directeur de programme au sein de Safran Nacelles

Le secteur aérien a adopté en 2021 l'objectif de la neutralité carbone d'ici 2050 et convergé rapidement sur les leviers de décarbonation requis pour atteindre cet objectif. Cette décarbonation nécessite toutefois le développement massif et rapide d'une filière de carburants aériens durables. Aux côtés de la biomasse, dont les ressources sont empreintes d'incertitude, l'électricité décarbonée apparaît clé pour la production de carburants de synthèse. Le secteur aérien français pourrait ainsi représenter une consommation électrique indirecte de l'ordre de 150 TWh en 2050.

Le développement d'une nouvelle filière industrielle de production de carburants de synthèse, fortement électro-intensive, représente une opportunité de nouvel usage pour l'électricité nucléaire. Le nouveau nucléaire devra toutefois se montrer compétitif face aux sources d'électricité renouvelables centralisées, sur un marché des carburants aériens durables ou Sustainable Aviation Fuels (SAF) qui sera mondial.

Au début des années 2000, l'association entre les secteurs aérien et nucléaire évoquait plutôt la prise en compte, dans les études de sûreté de l'EPR, du risque associé à la chute d'un avion de ligne sur le réacteur. Une vingtaine d'années plus tard, c'est l'exigence de décarbonation du secteur aérien, et l'ampleur des besoins énergétiques associés, qui invite à repenser les liens avec l'industrie nucléaire.

Si les émissions de gaz à effet de serre de l'aviation sont modestes au niveau mondial (2,5 % en 2019), le secteur est soumis à une pression croissante pour se décarboner. Après un premier engagement pris en 2008 de diviser par deux ses émissions de gaz à effet de serre entre 2005 et 2050, le secteur aérien s'est engagé en 2021 à atteindre la neutralité carbone au niveau mondial en 2050, objectif adopté en 2022 par l'ensemble des États réunis au sein de l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI).

La décarbonation du secteur aérien repose sur le développement massif des carburants durables

Le secteur aérien se caractérise par un petit nombre d'acteurs technologiques (deux grands avionneurs, Airbus et Boeing, quelques grands motoristes, etc.) imbriqués dans des chaînes de valeur globales. Cela entraîne un fort niveau de coopération, qui a contribué à une convergence rapide sur les leviers de décarbonation accessibles. Toutes les feuilles de route de décar-

bonation de l'aviation¹ reposent ainsi sur trois leviers technologiques :

- l'amélioration de la performance énergétique des avions ;
- la transition vers les carburants aériens durables ;
- l'amélioration de l'efficacité des opérations aériennes et au sol.

Améliorer fortement l'efficacité énergétique des avions et des opérations

Comme dans d'autres secteurs, améliorer l'efficacité énergétique constitue le premier levier de la stratégie de décarbonation. Le renouvellement régulier des flottes d'avion a généré ces dernières décennies un progrès continu de l'efficacité énergétique d'environ 1,5 % par an. Atteindre la neutralité carbone d'ici 2050 suppose une rupture dès la prochaine génération d'avion, mise en service dans la décennie 2030 et qui constituera la majorité de la flotte en 2050. Safran estime ainsi que le futur remplaçant de l'A320, mis en service vers 2035, devrait viser un gain de consommation de 30 % par passager.kilomètre, soit le double du gain usuel entre deux générations.

¹ Par exemple : Waypoint 2050 (2021) au niveau mondial, Destination 2050 au niveau européen, feuille de route du secteur aérien (2023) au niveau français, ou encore les scénarios de l'association AéroDécarbo.

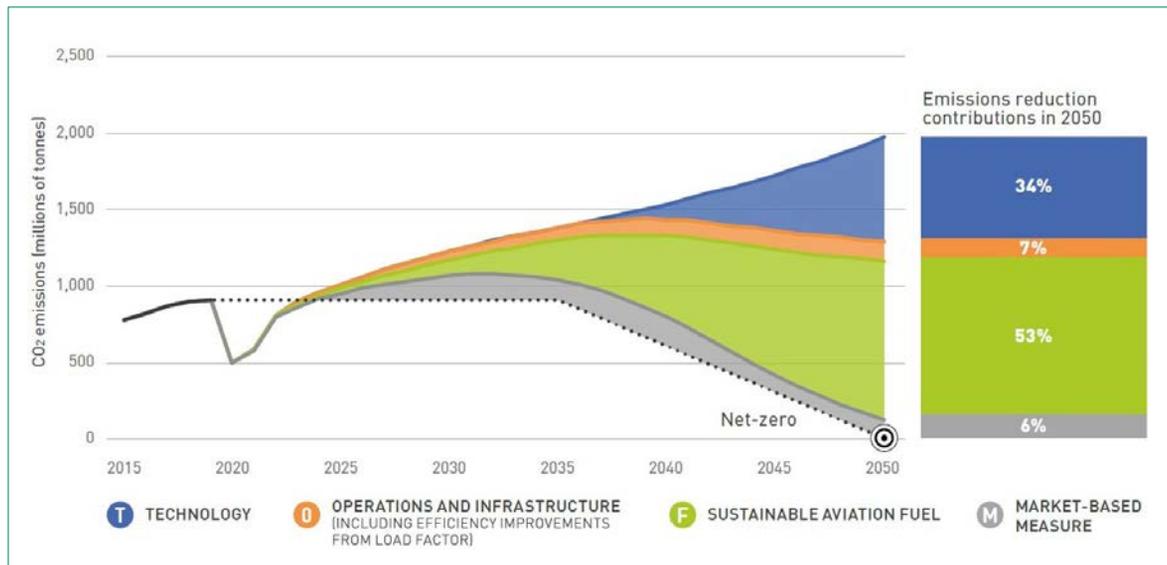


Figure 1 : Trajectoire de décarbonation du secteur aérien (ATAG, 2021).

Atteindre une telle performance suppose de combiner l'ensemble des pistes d'amélioration technologiques identifiées sur les avions :

- La motorisation : Safran et GE Aerospace travaillent notamment sur les matériaux résistant aux hautes températures, l'utilisation d'un réducteur pour la soufflante, l'hybridation électrique, ainsi qu'une architecture non carénée, pour gagner jusqu'à 20 % de consommation au niveau du moteur.
- L'aérodynamique : des progrès significatifs sont attendus grâce à l'allongement des ailes et l'optimisation de leur forme.
- L'allègement : il s'agit de réduire la masse des aérostructures et des systèmes embarqués, grâce à des matériaux plus légers (composites) ou la fabrication additive.
- L'électrification : la substitution croissante des systèmes hydrauliques, pneumatiques ou mécaniques par l'électrique permet un allègement des réseaux, et des prélèvements énergétiques optimisés sur les moteurs.

En complément, un ensemble de leviers relatifs aux opérations aériennes et au sol pourrait apporter 5 à 10 % d'efficacité supplémentaire d'ici 2050 : roulage électrique au sol, recours à des trajectoires plus directes grâce à une meilleure gestion du trafic aérien, etc. Si les innovations technologiques associées sont bien identifiées, ces leviers reposent aussi sur des évolutions organisationnelles importantes du contrôle aérien.

Tous ces progrès combinés pourraient apporter des gains d'efficacité énergétique de l'ordre de 2 % par an, mais ne permettront pas de réduire significativement les émissions compte tenu de la croissance forte du secteur. À titre d'exemple, le scénario Net Zero 2050 de l'Agence internationale de l'énergie (2021) prévoit une consommation d'énergie finale stable sur la période 2019-2050, résultant d'un quasi-doublement du trafic de

passagers. La décarbonation du secteur suppose donc une transition profonde vers de nouvelles énergies.

Assurer la transition vers des carburants bas-carbone

La propulsion électrique n'apportant pas l'autonomie requise, l'aviation demeurera largement propulsée par des turbines à gaz à l'horizon 2050. Deux types de carburants décarbonés sont envisagés : les carburants aériens durables ou Sustainable Aviation Fuels (SAF) ; et l'hydrogène – cette deuxième voie présente toutefois des défis majeurs et sa contribution à la décarbonation ne sera significative qu'au-delà de 2050.

Les SAF sont des carburants liquides utilisables en mélange avec le kérosène, et à terme purs, constitués de carbone non fossile. Ils sont indispensables pour décarboner la génération actuelle d'avions, et le demeureront pour les vols long-courriers pour lesquels l'hydrogène n'est pas une solution même à long terme.

La Figure 2 de la page suivante, extraite du rapport de l'Académie des Technologies (2023), illustre les principaux procédés et ressources de production des SAF. Les biocarburants avancés, qui apportent une réduction de CO₂ d'environ 80 % sur leur cycle de vie par rapport au kérosène, sont déjà matures. Des installations de production de biocarburants à partir d'huiles usagées sont en service, comme celle de TotalÉnergies à La Mède en France. Leur production s'est élevée à environ 300 kt en 2022, soit 0,1 % de la consommation mondiale de carburant aérien. Plusieurs nouvelles filières arriveront à la maturité industrielle dans les prochaines années, notamment les procédés Fischer-Tropsch appliqués après la gazéification de biomasse, ou la famille de procédés Alcohol-to-Jet. Contrairement au secteur routier, seules les matières premières dites de deuxième génération peuvent être utilisées pour la production de SAF (huiles usagées, graisses animales, déchets, résidus agricoles ou forestiers...).

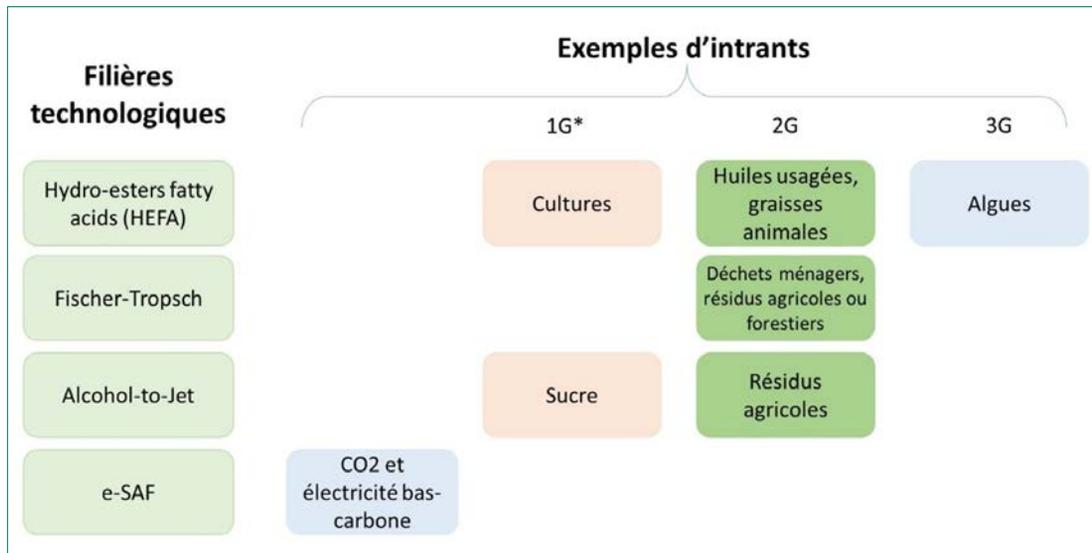


Figure 2 : Typologie des procédés et ressources pour la production de SAF (d'après Académie des Technologies, 2023).

* Les SAF à partir de cultures ou de sucres ne sont pas autorisés par le droit européen.

Les carburants de synthèse ou eSAF, produits à partir d'hydrogène décarboné et de CO₂, font l'objet de projets pilotes et devraient se développer fortement dans la décennie 2030.

Le développement des SAF ne présente pas d'enjeu technologique majeur sur les avions. Les avions en service peuvent déjà en utiliser jusqu'à 50 % en mélange, et les principaux avionneurs se sont engagés à livrer des avions compatibles avec 100 % de SAF d'ici 2030.

L'émergence des SAF a été longtemps freinée par leur coût élevé (3 à 5 fois celui du kérosène) et l'absence de régulation. Les initiatives des dernières années, notamment en Europe et aux États-Unis, devraient enfin permettre un développement important de la production :

- L'Union européenne a adopté un mécanisme d'obligation d'incorporation de carburants aériens durables, avec une trajectoire pluriannuelle qui assure une grande visibilité aux acteurs (voir le Tableau 1).
- De leur côté, les États-Unis se sont fixés l'objectif d'incorporer 10 % de SAF en 2030 et 100 % en 2050. Surtout, ils ont intégré dans l'Inflation Reduction Act un soutien fiscal à l'incorporation de SAF, permettant de combler l'écart avec les incitations relatives au biodiesel. Combiné à des aides locales dans plusieurs

États américains, ce soutien est proche d'instaurer une parité avec le kérosène, même si la visibilité sur les mécanismes fiscaux est faible à long terme.

La production de carburants durables sera un consommateur majeur d'électricité décarbonée

La décarbonation de l'aviation suppose le développement rapide d'une filière industrielle des SAF, à une échelle majeure. Selon les hypothèses de trafic et d'efficacité énergétique, les scénarios identifient un besoin de SAF en 2050 typiquement compris entre 250 Mt (AIE (2021), avec une croissance modérée du trafic et un taux d'incorporation de 80 %) et 450 Mt (ATAG (2021), variante haute pour les SAF), à comparer à une consommation de kérosène de 331 Mt en 2019². Les points de passage intermédiaires, dans les différents scénarios, dépendent essentiellement de l'ambition climatique visée : le scénario de l'AIE, qui vise un réchauffement inférieur à 1,5°C, suppose ainsi un taux d'incorporation de 50 % dès 2040. Le Tableau 2 présente une synthèse des ordres de grandeur des besoins de SAF à différents horizons et sur différents périmètres.

L'électricité décarbonée, *via* la production d'hydrogène par électrolyse, jouera un double rôle dans la produc-

Tableau 1 : Trajectoire d'incorporation de carburants durables aériens prévue par le règlement RefuelEU Aviation.

	2025	2030	2035	2040	2045	2050
% d'incorporation de SAF	2 %	6 %	20 %	34 %	42 %	70 %
Dont % minimum de carburants synthétiques	/	1,2 % en moyenne en 2030-31, 2 % en moyenne entre 2032 et 2034	5 %	10 %	15 %	35 %

² Source : AIE.

Tableau 2 : Ordre de grandeur des besoins en SAF (Académie des Technologies, 2023).

Besoin en SAF (Mt)	2030	2035	2040	2050
Monde	20	70	185	400
Europe	2,5	10	16	30
France	0,5	2	3	6

tion de SAF. Elle est tout d'abord un intrant clé pour la production de carburants de synthèse³, ou eSAF. Le bénéfice climatique des eSAF ne sera réel que dans le cas où le carbone, seconde brique, n'est pas d'origine fossile : les mécanismes de capture directe de CO₂ dans l'air, fortement consommateurs d'énergie⁴, apparaissent donc nécessaires au développement des eSAF. Le rendement complet de la chaîne de production des eSAF se situe actuellement autour de 45 %⁵, mais pourrait approcher à terme 55 % dans des installations optimisées⁶. On rappellera que le kérosène représenterait typiquement 60 % des carburants produits, le reste correspondant à une coupe naphta intéressant le secteur de la chimie. D'autre part, l'hydrogène décarboné pourrait contribuer à améliorer fortement le rendement énergétique des procédés de production des biocarburants avancés⁷.

Le besoin d'électricité décarbonée dépendra fortement des ressources disponibles en biomasse, sur lesquelles les incertitudes sont élevées : disponibilité

de la biomasse brute dans un contexte de changement climatique ; questions technico-économiques sur la mobilisation de cette biomasse, peu dense en énergie ; concurrence avec d'autres usages actuels ou futurs (secteur routier, industrie lourde, secteur maritime...).

Malgré cette incertitude, le besoin d'électricité décarbonée apparaît considérable dans les premiers exercices de prospective qui l'ont caractérisé. Le secteur aérien français, d'une part, et l'Académie des Technologies, d'autre part, ont évalué en 2023 les besoins d'électricité nécessaires à la décarbonation des vols au départ de la France. Bien que leurs hypothèses soient différentes, ces travaux dessinent des ordres de grandeur similaires, présentés au Tableau 3 ci-dessous.

Au niveau mondial, le scénario Net Zero de l'AIE (2021) décrit une consommation de 22 Mt d'hydrogène en 2040 et 52 Mt en 2050 pour le secteur aérien. L'aviation représenterait alors 10 % de la consommation mondiale d'hydrogène, soit environ 1 500 TWh d'électricité décarbonée, compte tenu du mix moyen de production d'hydrogène du scénario.

Ces besoins considérables conduisent à la conclusion que la disponibilité d'énergie décarbonée pourrait être le principal facteur limitant la décarbonation du secteur aérien. Si l'on suppose par ailleurs cette décarbonation comme un impératif, l'énergie disponible serait la principale contrainte pour la croissance du trafic⁸. Cette prise de conscience est encore récente et peu de scénarios de décarbonation de l'aérien intègrent actuellement un réel bouclage énergétique.

Tableau 3 : Évaluation des besoins d'électricité décarbonée pour le secteur aérien.

	Électricité décarbonée mobilisée*	Hypothèses
Académie des Technologies	50 TWh en 2040 170 TWh en 2050	30 % SAF en 2040, 60 % en 2050 6,7 Mt de biomasse sèche disponible pour le secteur aérien (10 % du gisement français) Rendement énergétique optimal
Secteur aérien	Entre 78 et 153 TWh en 2050 selon l'ambition	Hypothèse basse : 63 % de SAF en 2050 dont 28 % d'e-fuels Hypothèse haute : 85 % dont 50 % d'e-fuels Demande énergétique inférieure au scénario de l'Académie des Technologies (croissance modérée, efficacité énergétique plus forte)

³ Et pour la production d'hydrogène liquide, utilisé de manière plus marginale à l'horizon 2050.

⁴ Sous forme de chaleur pour les procédés les plus avancés, mais aussi d'électricité pour des procédés émergents.

⁵ Feuille de route de décarbonation du secteur aérien, 2023.

⁶ Électrolyse haute température, recyclage de la chaleur de la réaction exothermique Fischer-Tropsch pour alimenter le procédé de capture du CO₂ dans l'air (Académie des Technologies, 2023).

⁷ L'apport d'hydrogène permet d'approcher le rapport 1 / 2 entre carbone et hydrogène, visé dans le carburant final, alors que ce rapport est proche de 2 / 3 dans la biomasse (Académie des Technologies, 2023).

Quel rôle pour le nucléaire dans la décarbonation du secteur aérien ?

L'émergence de la filière des carburants durables aériens représente une opportunité de développement industriel et de renforcement de la souveraineté écono-

⁸ Le scénario de l'AIE (2021) limite ainsi la croissance à environ 2 % par an d'ici 2050, en faisant l'hypothèse d'une maîtrise de la demande.

mique des pays consommateurs. Dans le même temps, de nouveaux pays producteurs s'affirment, en particulier ceux disposant d'un potentiel de production d'électricité renouvelable à bas coût (Chili, Moyen-Orient, etc.). À ce stade, le nucléaire n'apparaît pas encore identifié au niveau mondial comme un contributeur significatif pour la production de SAF, et les projets pilotes de production d'eSAF parient sur un approvisionnement en électricité renouvelable. Il est toutefois révélateur qu'EDF s'intéresse à la production d'eSAF (projet Take Kair) ou que Rolls-Royce mette en avant l'intérêt de son projet de Small Modular Reactor pour alimenter la production d'eSAF destiné à décarboner ses moteurs d'avion.

L'échelle des besoins électriques de la production d'eSAF fait apparaître le nucléaire comme une solution pertinente. Les installations de production d'eSAF sont soumises à un effet d'échelle, pour les procédés spécifiques à cette technologie comme pour le raffinage final des carburants. À titre d'exemple, le projet KerEauZen d'ENGIE, l'un des premiers de taille industrielle en France, vise un volume de 70 000 tonnes d'eSAF par an : cela requiert une capacité d'électrolyse de 250 MW, soit une consommation typique de 1,5 à 2 TWh d'électricité annuelle sous la forme d'un ruban.

Au-delà de la production d'électricité elle-même, l'existence d'un réseau électrique adapté constitue une condition-clé pour ces projets, et l'on peut noter que les premiers projets soutenus par France 2030 sont situés sur des zones propices du réseau, à proximité d'installations de production existantes ou arrêtées ces dernières années⁹.

Pour représenter une source d'électricité attractive pour les eSAF, le nouveau nucléaire devra toutefois démontrer sa compétitivité. Le coût de l'électricité représenterait en effet entre un tiers et la moitié des coûts de production des eSAF. Or le marché de ces carburants est mondial : contrairement à l'électricité ou l'hydrogène, les carburants de synthèse sont facilement transportables sur de longues distances, et leurs caractéristiques techniques sont normées au niveau mondial. Leur production se fera donc naturellement, au moins au début, à proximité des ressources que constituent une électricité décarbonée compétitive et du CO₂¹⁰.

Au-delà même de la compétitivité, prévisibilité des prix et maîtrise des risques seront clés pour les investisseurs comme les clients des eSAF. À court terme, le financement des projets d'eSAF est encore balbutiant, compte tenu de leur caractère innovant et des risques du passage à l'échelle de cette technologie. Dans ce contexte, les acteurs financiers cherchent à supprimer les risques des projets sur le volet de l'approvisionnement électrique. Par ailleurs, les compagnies aériennes clientes recherchent une visibilité sur les prix des eSAF, bien plus élevés que le kérosène. Ces exigences conduisent les producteurs émergents des eSAF à prévoir des contrats de long terme (PPA)

avec des producteurs d'électricité, voire à s'intégrer de la production d'électricité à la production des carburants. Pour faire du nouveau nucléaire une source clé d'approvisionnement pour la production d'eSAF, la capacité à signer des contrats de long terme, et l'appréhension des risques spécifiques au nucléaire par les financeurs des projets eSAF, seront donc importantes. Dans les deux cas, la puissance publique pourrait jouer un rôle si la volonté politique existe de produire des eSAF sur le territoire français.

Conclusion

La trajectoire de décarbonation de l'aérien vers la neutralité carbone requiert des quantités considérables d'énergie décarbonée, sous la forme de biomasse et d'électricité décarbonée. La consommation d'eSAF par le secteur aérien français pourrait ainsi représenter une consommation électrique de l'ordre de 150 TWh en 2050. L'ampleur de ces besoins énergétiques est encore mal prise en compte par le secteur aérien au niveau mondial, et constituera sans doute le principal défi de la décarbonation du secteur.

Le développement du nouveau nucléaire pourrait répondre à ce nouvel usage de l'électricité décarbonée, à condition toutefois de se montrer compétitif face aux sources d'électricité renouvelables centralisées, sur un marché des SAF qui sera mondial.

Dans ce contexte, le rôle de la puissance publique est clé, tant pour accompagner l'émergence et le développement industriel de la filière des SAF, que pour intégrer aux exercices de planification les besoins d'électricité associés et définir une stratégie sur la production en France de ces carburants.

Bibliographie

- ACADÉMIE DESTECHNOLOGIES (2023), « La décarbonation du secteur aérien par la production de carburants durables ».
- AIR TRANSPORT ACTION GROUP (2021), "Waypoint 2050", 2nd édition.
- FNAM, FRANCE HYDROGÈNE, GIFAS, UAF, UFE, UFIPEM (2023), « Feuille de route de décarbonation de l'aérien ».
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (2021), "Net Zero by 2050", IEA, Paris.

⁹ Dunkerque, Le Havre, Gardanne.

¹⁰ Les exigences relatives à l'origine du CO₂ peuvent constituer une forme de barrière à l'entrée : l'Union européenne n'autorise que jusqu'en 2040 l'utilisation de CO₂ capté à partir de rejets industriels, privilégiant le CO₂ biogénique ou capté dans l'air.