

# CARBURANTS DURABLES POUR AVIATION DÉCARBONÉE

par Jean Bourguinat et Alain Coutrot



## Introduction :

Les carburants durables, ou SAF (*Sustainable aviation fuels*) représentent un volet important de la feuille de route de l'aviation décarbonée.

Tous les acteurs du monde aéronautique et les pétroliers se mettent en ordre de marche sur le sujet. Les organismes internationaux comme l'OACI et l'IATA émettent résolutions et directives, et la Commission Européenne, en déclinaison de la loi européenne du Climat de 2021, a mis en place la recommandation *REfuel EU*, qui devra être appliquée par les compagnies : Il sera obligatoire d'incorporer une part minimale de SAF dans les carburants mis à disposition des aéronefs dans les aéroports de l'UE, à compter de 2025.

Les médias se font écho des premières utilisations de SAF : Ainsi, nous venons d'apprendre le prochain avitaillement en SAF des Beluga, visibles dans le ciel de Nantes, et qui transportent les éléments d'Airbus entre les différentes usines européennes. De telles ondes positives sont les bienvenues pour l'aviation, trop souvent accusée de tous les maux, le grand public n'ayant pas toujours les informations sur les progrès continus accomplis dans le domaine du respect de l'environnement depuis plusieurs dizaines d'années.

Néanmoins, de très nombreuses questions se posent sur la transition entre les carburants fossiles et les carburants durables : Tout d'abord, pour obtenir la neutralité carbone en 2050, la réduction des émissions de l'aviation repose à 50 % sur les SAF : n'est-ce pas un pari risqué face à la maturité de cette filière ? Est-il raisonnable d'utiliser des terres agricoles pour obtenir une biomasse destinée à élaborer des carburants d'aviation ? Dans cet article, nous essayons de synthétiser les très nombreuses informations concernant les SAF, (hydrogène exclu) en vous donnant bien entendu l'opinion des auteurs. Nous aborderons le cadre réglementaire, les process de fabrications existant et à venir, et les principaux projets français en cours. Nous essayerons enfin de donner quelques idées sur l'économie de cette nouvelle filière et du financement de cette transition.

## Les différents procédés pour améliorer les SAF :

Le Jet Fuel est un mélange d'alcanes, des chaînes carbonées de longueur échelonnées de 8 à 16 atomes de carbone sur lesquelles se greffent des atomes d'hydrogène. Ce mélange est régi par des spécifications qui lui confèrent des propriétés adaptées à son emploi

comme carburant d'aviation. Le concept de SAF revient à synthétiser des molécules similaires avec du carbone biogénique : ce carbone est pris dans l'atmosphère directement ou indirectement en piochant dans la biomasse, elle-même alimentée en carbone biogénique par photosynthèse. Ainsi le carbone émis à la combustion rentre dans un cycle fermé « neutre » en termes d'accumulation de gaz à effet de serre dans l'atmosphère.

Les sources de carbone biogéniques sont infinies : plantes, déchets végétaux, graisses, algues, apparaissant en 3 générations et même CO<sub>2</sub> récupéré dans l'atmosphère :

<b>1<sup>ère</sup> génération</b>	<b>Matières premières agricoles</b> Exemples : Canne à sucre, betterave, colza, maïs, tournesol, céréales, ect.
<b>2<sup>e</sup> génération</b>	<b>Matières végétales lignocellulosiques</b> Exemples : Résidus agricoles, déchets forestiers, cultures non alimentaires, ect.
<b>3<sup>e</sup> génération</b>	<b>Micro-organismes</b> Exemples : Micro-algues

Pour transformer cette matière première, la chimie met à disposition une batterie de procédés bien connus. Ils ont tous deux points communs : ils ont besoin d'hydrogène et d'énergie. Pour assurer la neutralité l'hydrogène devra être « vert », c'est-à-dire provenant d'une électrolyse alimentée en électricité zéro carbone, renouvelable ou nucléaire. Au-delà de l'électrolyse ces procédés nécessitent un surcroît d'énergie donc toujours zéro carbone : la dépense énergétique totale varie entre 30 % et 200 % de l'énergie contenue dans le carburant obtenu.

Trois procédés sont utilisés, tous très courants dans la pétrochimie :

- Le Fischer-Tropsch : il transforme un mélange de gaz CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub> en hydrocarbure. Les Allemands l'ont mis en œuvre pendant la 2<sup>e</sup> guerre mondiale, mais leur CO<sub>2</sub> provenait du charbon. En pyrolysant la biomasse, il est possible d'obtenir du CO<sub>2</sub> biogénique que l'on combine à de l'hydrogène vert.
- L'hydrotraitement d'huile végétale ou HVO : il part d'une huile, végétale ou pas (les graisses de déchets ménagers feront aussi l'affaire), et par une réaction à haute température avec de l'hydrogène conduit à un hydrocarbure. Ces

intrants peuvent aussi être mélangés avec du pétrole fossile dès les opérations de raffinage, on parle de co-processing.

- L'Alcool to Jet (AtJ): c'est un procédé générique qui est appliqué à de l'alcool de toute provenance, culture de canne à sucre ou céréale, et dans le futur alcool obtenu par fermentation de sucres cellulosiques récupérés sur des déchets végétaux.

À plus long terme est envisagée la capture directe du CO<sub>2</sub> atmosphérique : mais la machinerie de pompage et d'absorption d'un CO<sub>2</sub> présent à 400 ppm dans l'air en fait une voie très coûteuse en énergie, et gourmande en espace... Cependant quelques sites pilotes sont en construction dans les déserts du Sud Chili.

À ce jour une dizaine de SAF ont été qualifiés selon l'ASTM (organisme de normalisation) qui garantit leur emploi en mélange avec du carburant fossile jusqu'à un taux de 50 %.

Des vols spéciaux peuvent être réalisés, pour démonstration, avec 100 % de carburant SAF ; ainsi, Virgin Atlantic vient d'effectuer le premier vol transatlantique (Royaume-Uni->États-Unis), le 28 novembre 2023, les passagers étant des officiels et des scientifiques, avec une forte participation financière du gouvernement britannique.

Deux considérations d'importance :

- Le SAF s'accompagne toujours d'autres produits dans des proportions modulables, mais jamais supérieures à 70 % de jet-fuel : carburants plus légers tel l'essence, plus lourds comme le diesel, du gaz ou des produits valorisables dans d'autres domaines, chimie verte, pharmacie, cosmétiques, matériaux qui ont leurs propres agendas de décarbonation. On recherchera donc une synergie entre ces différents débouchés.
- Le kérosène, fossile ou bio, est un mélange d'alcane : il sera possible d'ajuster la composition des SAF pour obtenir des propriétés « hors spécification actuelle ». Ainsi une voie prometteuse pour réduire l'impact climatique de l'aviation serait de minimiser voire supprimer les traînées de condensation principalement dues aux traces d'aromatiques et de soufre dans le jet fuel A1.

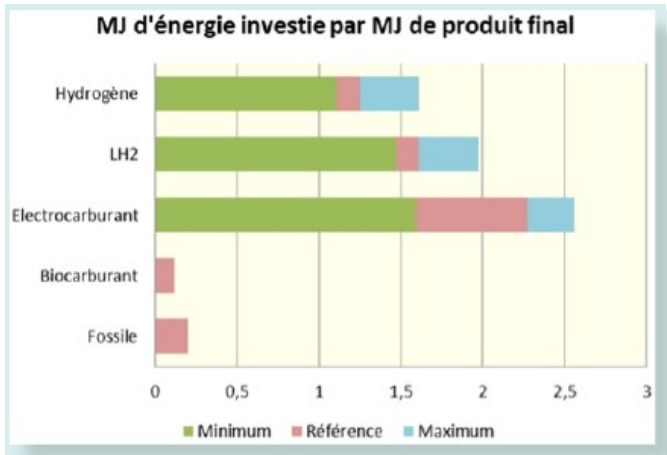
Plusieurs obstacles se dressent sur la route du déploiement des SAF :

- La viabilité d'une production de carburant durable est avant tout déterminée par la disponibilité du carbone biogénique et par le coût énergétique de son traitement avant l'entrée dans l'un des 3 procédés. Les intrants mobilisant des terres agricoles débouchant sur des carburants dit de génération 1G bien que favorablement dotés sous ces deux angles ne sont tolérés qu'en petits volumes, et pourraient être interdits à terme : c'est le cas des carburants HVO faisant appel aux cultures d'oléagineux. Les carburants 2G font eux appel à des intrants biomasse qui n'entrent pas en concurrence avec l'alimentation : déchets de culture, ou sylvicoles, cultures spécifiques <sup>1</sup> s'insérant dans une agriculture durable ou sur des terres en friche. c'est sur cette catégorie que la feuille de route des SAF prend appui massivement. Les cultures de microalgues constitueront-elles la génération 3
- Les sources de biomasse doivent satisfaire aux conditions nécessaires à la neutralité de leur écosystème dans sa globalité. En effet, leur exploitation ne doit pas provoquer de modifications d'usage des terres dans les parcelles exploitées et dans leur environnement qui entraînerait un bilan carbone global négatif : les connaissances de ces mécanismes sont encore embryonnaires et leur développement devra faire partie intégrante des choix de filière.
- Les limites de la biomasse lignocellulosique sont encore mal cernées, l'impact de son exploitation intensive sur le puits de carbone que constituent les forêts est une question ouverte. En outre, elles sont aussi sujettes à une compétition et des arbitrages entre ses différents usages : énergie sous toutes ses formes (carburants, biogaz, énergie bois), matériaux et demi-produits pour une chimie verte.
- Aussi les acteurs de l'aviation intègrent-ils en complément (à hauteur de 30 %) dans leur feuille de route les carburants PtL dont l'intrant carboné est le CO<sub>2</sub> capté sur des sources anthropiques (fumées industrielles) ou dans l'atmosphère.
- La particularité des e-fuel <sup>2</sup> (e-BtL et PtL) est

1 Comme le mischantus ou « herbe à éléphant »

2 On regroupe parfois PtL (Power to Liquid) et e-BtL sous la dénomination e-fuel ou électro carburant: leur carbone provient soit de la capture du CO<sub>2</sub> anthropique ou industriel, soit de la pyrolyse de

leur recours massif à l'hydrogène : 0,3 à 0,4 kg d'hydrogène par kg de jet-fuel, à comparer à 5 % environ pour la production des biocarburants. Il en résulte un besoin d'énergie électrique massif représentant plus de 2 fois le contenu énergétique final du carburant. Selon les scénarios 2050 on parle pour le jet fuel avitaillé dans les aéroports français de 57 à 140 TWh<sup>3</sup> : à ce stade de telles volumes n'entrent pas dans la planification énergétique française.



**Déploiement des carburants durables en France : Décollage imminent**

Nous présentons quelques chiffres clé, puis l'existant et enfin les projets dans le domaine des carburants durables :

1 Airbus 320 consomme 3l/100km/passager de kérosène

1 l kérosène brûlé représente une émission de 2,5 kg de CO2

Consommation Kérosène 2019 (Millions tonnes)			
Monde 260	UE 53, (France 7)	Amérique Nord 90	Asie 80
Projection du trafic aérien mondial 2050 : doublement			
RPK (milliards km pax)	Demande SAF (Mt)	Electricité décarbonée nécessaire pour SAF	Investissements (milliards \$)
≈ 20	350 à 400 Mt (France 6,6 Mt)	≥ 3000 TWh* (France 62 TWh**)	≥ 1000 B\$
* production mondiale d'électricité 2022 : 28 000 TWh. Projection 2050 : 62 000 TWh ** production électricité France 2022 : 450 TWh. Projection 2050 : 630 TWh			

- La feuille de route EU sur les carburants durables prévoit 5 % d'incorporation en 2030, 20 % en 2035, et jusqu'à 63 % en 2050 (total biocarburants et carburants de synthèse e-fuels).

biomasse

3 Source : Feuille de route CORAC. La production électrique française 2022 a été de 445 TWh

- Aujourd'hui, quelques aéroports français seulement peuvent proposer des SAF de manière permanente : l'aéroport du Bourget, et celui de Clermont-Ferrand avitaillent les avions d'affaires, dont la compagnie Michelin Air Services, tandis que l'aéroport de Bordeaux-Mérignac propose des SAF pour les vols commerciaux.
- La plupart des compagnies aériennes, même les *low cost* mettent en avant une politique environnementale active, et communiquent notamment sur le renouvellement de flottes et l'introduction des carburants durables<sup>4</sup>. Les compagnies proposent aussi aux passagers de participer, lors de l'achat du billet d'avion, à la compensation carbone ou aux investissements dans les SAF<sup>5</sup>.
- Certaines compagnies aériennes ont conclu des contrats avec des pétroliers pour l'approvisionnement mais aussi le développement des SAF. Ainsi Air France affiche avoir l'ambition d'aller plus loin que la feuille de route de l'UE dans l'incorporation des SAF, et aurait réservé déjà environ 2,5 M Tonnes de carburant jusqu'à 2036, avec TotalEnergies, Neste (Finlande), et DG fuels (USA). Air France sera aussi le client privilégié du projet Take Kair, qui fournira du carburant de synthèse en Loire-Atlantique vers 2028.
- Le pétrolier TotalEnergies produit des SAF par la technique hydrotraitement des huiles végétales, dans la bioraffinerie de La Mède, et bientôt dans le cadre de la reconversion de la raffinerie de Grandpuits. Il est aussi prévu de développer, dans des raffineries traditionnelles, l'élaboration de carburant durable par co processing.
- Safran, comme les autres motoristes, s'est préoccupé depuis une dizaine d'années de la capacité de ses moteurs à fonctionner au SAF, enchaînant essais de combustion et vols de démonstration en collaboration avec compagnies aériennes et avionneurs, sur tout type d'appareils, avions civils ou militaires, hélicoptères. Aujourd'hui il mène avec Airbus, Dassault et l'ONERA des études sur les effets

4 Des accrochages entre les organismes régulateurs de publicité en Grande-Bretagne et certaines compagnies sont récemment survenus pour des publicités environnementales apparemment peu fondées.

5 À notre avis cette dernière politique commerciale est assez étonnante, car le passager ne sait pas si son vol utilise effectivement le carburant SAF vertueux.

des SAF sur les émissions d'espèces minoritaires (imbrûlés, particules...) et la formation des traînées de condensation (projet VOLCAN). En outre, ses essais au banc migrent progressivement vers les SAF : en 2025 ils représenteront 35 % de cette consommation.

- L'hydrogène fera-t-il partie des SAF ? Airbus mise beaucoup sur l'hydrogène, avec en ligne de mire un court-moyen courrier. Mais la marche technologique et logistique est haute : dès que la mission s'allonge, la quantité d'hydrogène s'accroissant, il est obligatoire de l'embarquer sous forme liquide sous - 253°C. Les opérations de plein, de conservation dans les réservoirs, de transfert vers les moteurs deviennent éminemment complexes, sans parler de la logistique sur l'aéroport : si les SAF traditionnels hydrocarbonés assurent la neutralité, pourquoi s'atteler à de telles difficultés ? Cette option hydrogène ne jette-t-elle pas un doute sur la viabilité des SAF conventionnels ?

**Les projets carburants durables en cours**

Nous avons recensé des projets français impliquant les SAF, résumés sur un tableau :

Ces projets, soutenus par l'État, vont permettre de mettre en place des installations industrielles (TotalEnergies) ou des démonstrateurs, soit en carburant de synthèse en utilisant le CO2 récupéré d'industries polluantes, (REUZE et TAKE KAIR) soit en biocarburants (BIOTJET et ISOBUTENE Global bioénergies).

À l'horizon 2030, Le tonnage en biocarburants durables ainsi obtenu est de l'ordre de 500 000 Tonnes/an (285 000 T/an pour Grandpuits et 240 000 T/an pour l'ensemble des autres projets), en phase avec la demande de la feuille de route EU.

**Aspects économiques :**

Par rapport au coût du kérosène fossile, le biocarburant durable serait à ce jour 2 à 3 fois plus cher, et le carburant de synthèse (e-fuels) 5 fois plus cher .

En appliquant un raisonnement économique classique, les règlements imposant l'utilisation des SAF vont structurer la demande, ce qui doit développer les investissements, augmenter l'offre, et en final permettre de baisser le prix des produits. Ainsi, suivant les projections 2050, le biocarburant durable serait 2

Nom Projet	Acteurs	Résumé projet	Lieu	Statut
Grandpuits	Total Energies SARIA	Reconversion raffinerie de Grandpuits en bioraffinerie, recyclage huiles usagées (HEFA)	Grandpuits	Opérationnel en 2025
REUZE	Engie Infinium (USA) Arcelor Mittal	Capter CO2 sur sites Arcelor pour transformer en SAF, H2 produit par électrolyse	Dunkerque	Mise en service unité en 2026
TAKE KAIR	IFPEN Holcim EDF-Axens (Support Air France-KLM)	Utiliser CO2 issu cimenterie et H2 produit par électrolyse pour fabriquer SAF	Loire Atlantique	Lancement du projet en 2026
BIOTJET	IFPEN ELYSE	Fabriquer du Biocarburant a partir de déchets sylviculture	Pyrénées Atlantique	Opérationnel en 2027
Isobutène	GLOBAL BIOENERGIES	Fabriquer Isobutène, à partir sucres +bactéries L' isobutène est ensuite transformé en alcanes SAF	Evry	Construction une usine en 2026, puis une autre en 2028 (startup biotechnologies)
Hynoreva	HY2Gen	Fabriquer du Biocarburant a partir de déchets sylviculture	Gardanne	reconversion site centrale thermique Gardanne. Présentation prochaine projet à CNDP

fois plus cher que le kérosène fossile, et le carburant de synthèse 3 fois plus cher. (Chiffres 2023 et 2050 Étude Union Européenne).

La réalité nous paraît beaucoup plus compliquée : les sources de matières premières, la disponibilité de l'électricité verte nécessaire, la maturité des différents procédés, l'arbitrage des ressources entre différents types de transport à décarboner, dont le maritime, et enfin la répartition géographique des activités SAF seront à prendre en compte pour développer et stabiliser l'offre de carburants durables.

De manière pragmatique, les grandes compagnies aériennes ne s'y sont pas trompées, en s'empressant de bloquer les ressources SAF existantes.

À côté des SAF qui seraient produits en France, il y aura certainement des carburants durables importés, et l'impact global sur le réchauffement des pays exportateurs est aussi à prendre en compte. Enfin, les interactions entre les états, les industriels, et les organismes internationaux devront être productives, et concourir à un développement vertueux, avec un fonctionnement et des modèles qui pourraient être différents de ceux des carburants fossiles.

Malgré les progrès continus de consommation des réacteurs, le passager peut s'attendre à voir les prix des nouveaux carburants se répercuter sur le prix de son billet d'avion ; cela pourrait constituer une espèce d'incitation d'utiliser le transport aérien avec davantage de discernement. Comment se positionnera alors l'État Français qui subventionne les transports décarbonés ?

### Conclusions :

Les SAF ont le mérite d'être directement utilisables sur les avions existant et de ne pas nécessiter de changements majeurs dans les infrastructures actuelles. Pour réussir leur phase de décollage, nous pensons qu'il est important de :

- continuer le travail d'optimisation des compositions pour garantir un pouvoir lubrifiant des nouveaux carburants, ce qui permettra d'aller vers les 100 % de carburant renouvelable, tout en minimisant les particules et les traînées de condensation.
- accélérer sur la définition de la biomasse nécessaire et de son exploitation durable, en France, mais aussi en liaison avec d'autres pays partenaires et responsables dans ce domaine.

– travailler à l'intégration des productions des carburants durables dans l'environnement industriel, pour optimiser la dépense énergétique nécessaire, en ressource en électricité mais surtout énergie-chaleur (optimiser les activités consommatrices de chaleur et productrices de chaleur).

– rendre plus précise et compréhensible la feuille de route France, en déclinaison de la directive Européenne. Ceci est important pour les investisseurs (ordre de grandeur des investissements mondiaux nécessaires supérieur à 1000 Milliards de Dollars), comme pour le grand public, qui a le droit d'être informé précisément des efforts des acteurs et des enjeux dans ce domaine.

Nous espérons que cet article vous permettra de mieux connaître, et de suivre plus facilement ce sujet complexe et évolutif, qui est majeur pour une aviation décarbonée demain.

Quelques sites intéressants pour se documenter sur ce sujet en pleine évolution :

OACI : [Sustainable Aviation Fuel \(SAF\) \(icao.int\)](https://www.icao.int/sustainable-aviation-fuel/)

CORAC (Conseil pour la Recherche Aéronautique Civile) : [Accueil - CORAC Aéro Recherche - Aéronautique Civile : CORAC Aéro Recherche - Aéronautique Civile \(aerorecherche.com\)](https://www.aerorecherche.com/)

IATA : [Fact sheet: CORSIA \(iata.org\)](https://www.iata.org/en/pressroom/factsheets/Pages/fact-sheet-corsia.aspx) cette page explique les mécanismes du CORSIA ( Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation)



Publicité pour les SAF à l'aéroport de Francfort