

# Les carburants d'aviation durables (CAD), levier incontournable pour la décarbonation du secteur aérien

Par Florence DELPRAT-JANNAUD, Jean-Philippe HÉRAUD  
et Julie LHOMME-MAUBLANC  
IFP Énergies nouvelles (IFPEN)

Les carburants d'aviation durables (CAD) sont un levier incontournable pour la décarbonation du transport aérien, qu'il s'agisse de biocarburants durables produits à partir de résidus et déchets n'entrant pas en conflit avec un usage alimentaire, ou d'électro-carburants produits à partir de CO<sub>2</sub> et d'H<sub>2</sub>. Ils présentent non seulement une opportunité pour réduire les émissions de CO<sub>2</sub> et accroître la souveraineté énergétique, mais ils offrent aussi de nouveaux débouchés aux filières agricoles et sylvicoles en valorisant des déchets. Si les filières de production des CAD sont aujourd'hui en déploiement, il reste des défis à relever pour atteindre les cibles fixées par la réglementation. Avec une industrie aéronautique *leader* mondial, des technologies de production de carburants bas carbone développées par des acteurs français et des ressources lignocellulosiques en grande quantité, la France dispose de nombreux atouts pour être un acteur de référence des CAD.

Le transport aérien représente 10 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre (GES) du secteur des transports, soit 2 % des émissions mondiales de GES (IEA, 2023). En France, ces émissions représentent 5,3 % des émissions de GES totales en 2019 (ADEME, 2022). L'utilisation des carburants d'aviation durables (CAD) constitue, en complément de la sobriété, de l'optimisation des opérations en vol et au sol, et du renouvellement des appareils, le principal levier pour décarboner le secteur aérien. Elle devrait permettre de réduire jusqu'à 90 % les émissions de CO<sub>2</sub> par rapport au kérosène fossile sur le cycle de vie, de leur production jusqu'à leur combustion (ADEME, 2022).

Les carburants d'aviation durables – ou *sustainable aviation fuels* (SAF) – désignent des carburants renouvelables ou dérivés de déchets, qui répondent à des critères de durabilité définis par l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI) tels que la réduction des émissions de gaz à effet de serre, l'utilisation raisonnée de l'eau, de produits chimiques, la préservation de la qualité de l'air...

Les États membres de l'OACI ont fixé en octobre 2022 l'objectif ambitieux de réduire à zéro les émissions nettes de CO<sub>2</sub> d'ici à 2050<sup>1</sup>. Dans le monde, les réglementations se mettent progressivement en place :

- au niveau européen, les objectifs d'incorporation fixés par le règlement "ReFuelEU Aviation" visent l'intégration de 2 % de CAD en 2025, 6 % en 2030, pour aller jusqu'à 70 % en 2050 ;

- en France, dès 2022, un mandat d'incorporation avait été imposé à hauteur de 1 % ;
- les États-Unis se sont fixés en 2022 un objectif de 100 % SAF pour les vols domestiques à horizon 2050 ;
- le Japon a un objectif d'incorporation de 10 % de CAD à horizon 2030.

Si aujourd'hui seules quelques centaines de kilotonnes de CAD ont été commercialisées auprès des compagnies aériennes, leur production devrait croître significativement dans les prochaines années du fait du cadre réglementaire incitatif. À horizon 2030, l'Association du transport aérien international (IATA) estime ainsi la capacité de production mondiale à 24 Mt<sup>2</sup>. Cette accélération se traduit par :

- Une dynamique de certification de filières de production de CAD. En février 2024, onze procédés de conversion sont certifiés par l'ASTM (organisme de certification, anciennement American Society for Testing and Material), avec sept autres en cours d'évaluation.
- Un engagement des compagnies aériennes qui dépasse les réglementations d'incorporation. À titre d'exemple, le groupe Air France-KLM envisage d'incorporer au moins 10 % de CAD dès 2030<sup>3</sup>.

<sup>2</sup> <https://www.iata.org/contentassets/8d19e716636a47c184e7221c77563c93/energy-and-new-fuels-infrastructure-net-zero-roadmap.pdf>

<sup>3</sup> <https://www.airfranceklm.com/fr/newsroom/air-france-klm-reaffirme-ses-engagements-en-matiere-de-decarbonation-du-transport-aerien>

<sup>1</sup> <https://www.icao.int/environmental-protection/pages/SAF.aspx>

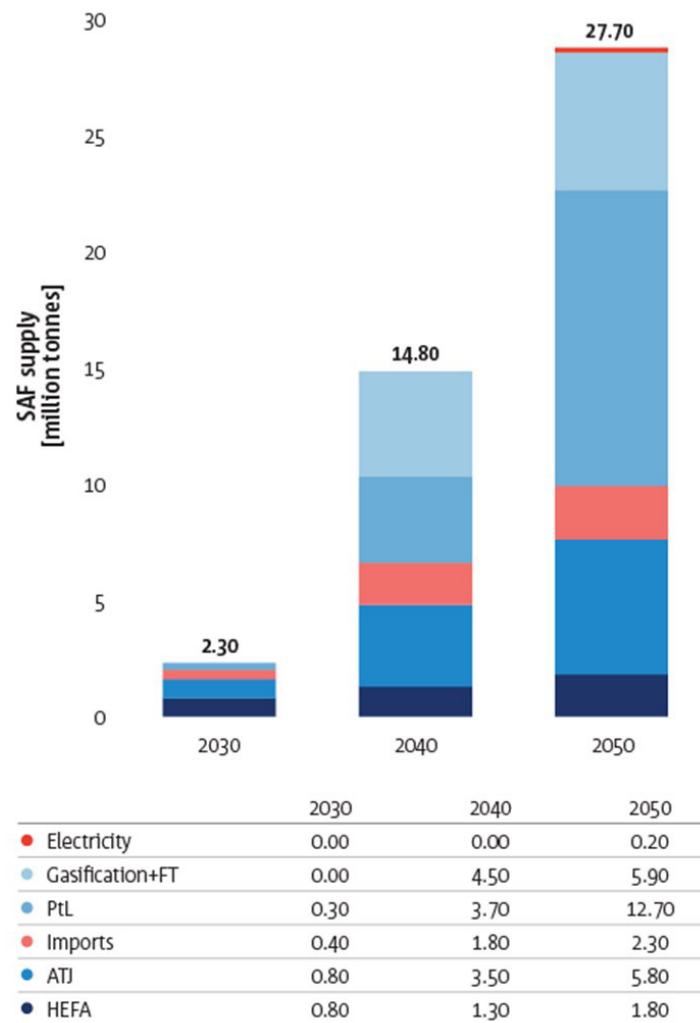


Figure 1 : Production de biocarburants estimée selon EASA (<https://www.easa.europa.eu/eco/eaer/topics/sustainable-aviation-fuels/current-landscape-future-saf-industry#production-capacity-and-demand-2020-to-2030>)

- Le développement d'unités de production de biocarburants : 85 projets sont annoncés en Europe dont 34 nouveaux projets en 2023<sup>4</sup>.

## Des technologies de production prêtes à être déployées

### À partir d'huiles de cuisson usagées ou de graisses animales (HVO ou HEFA)

La filière HVO (*hydrotreated vegetable oil* - huile végétale hydrotraitée) ou HEFA (*hydroprocessed esters and fatty acids*) est la filière de production la plus mature. Ce sera la principale filière de production de CAD d'ici 2030. Des unités industrielles sont aujourd'hui en opération à partir de ressources oléagineuses de première génération (soja, palme, colza), mais pour la production de CAD, elles devront utiliser des ressources de type huiles de cuisson usagées ou graisses animales, ressources dont le gisement est limité. Sur l'ensemble

de leur cycle de vie, les carburants ainsi produits permettent une réduction de 85 % des émissions de gaz à effet de serre (GES) par rapport à leur équivalent fossile (Directive sur les énergies renouvelables dite RED III<sup>5</sup>). L'EASA (Agence européenne de la sécurité aérienne) estime le niveau de production annuelle de CAD selon cette filière à 1,3 Mt en 2040<sup>6</sup> (voir la Figure 1).

La technologie repose sur deux étapes principales (voir la Figure 2) :

- l'étape d'hydrotraitement, qui vise à hydrogéner les oléfines et convertir des oxygénés ;
- l'étape d'hydroisomérisation, qui permet d'ajuster les propriétés à froid du kérosène par isomérisation des normales paraffines en iso paraffines.

Le rendement matière de ce procédé est d'environ 80 % (Stark *et al.*, 2016).

<sup>4</sup> <https://www.icao.int/environmental-protection/GFAAF/Pages/Production-Facilities.aspx>

<sup>5</sup> <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L2001>

<sup>6</sup> <https://www.easa.europa.eu/eco/eaer/topics/sustainable-aviation-fuels/current-landscape-future-saf-industry#production-capacity-and-demand-2020-to-2030>

En France, TotalEnergies opère une première unité HVO sur le site de la Mède (Bouches-du-Rhône)<sup>7</sup>. Cette unité utilise le procédé Vegan® développé par IFPEN, et produit environ 500 kt par an de carburants. TotalEnergies a par ailleurs annoncé la reconversion de sa raffinerie de Grandpuits (Seine-et-Marne)<sup>8</sup> et l'implantation d'une usine HVO d'une capacité de 400 kt par an de carburants.

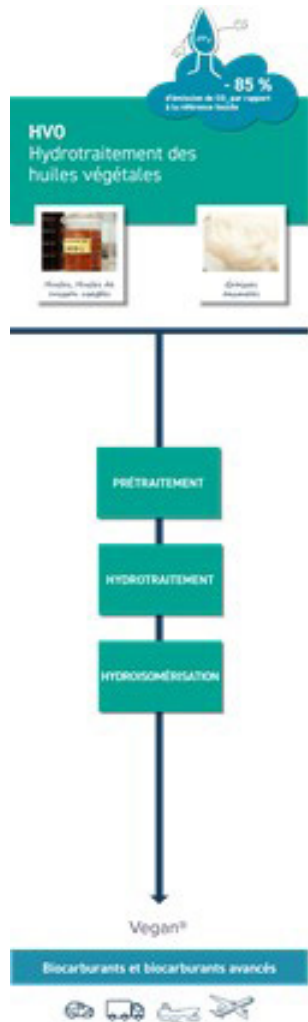


Figure 2 : Schéma de production de biocarburants par la technologie HVO ou HEFA (Source : IFPEN).

### À partir de biomasse lignocellulosique, par la voie thermochimique (BTL ou eBTL)

À partir de 2030, les biocarburants seront également produits à partir de biomasse lignocellulosique (résidus agricoles ou sylvicoles), par la voie BTL (*biomass-to-liquids*) ou conversion thermochimique de la biomasse) ou e-BTL (*e-biomass-to-liquids*).

<sup>7</sup> <https://totalenergies.com/fr/expertise-energies/projets/bioenergies/la-mede-un-site-tourne-vers-avenir>

<sup>8</sup> <https://grandpuits.totalenergies.fr/le-projet/trois-nouvelles-activites/projet-biojet-smr/le-fonctionnement-de-lunite-biojet-smr>

Ce procédé (voir la Figure 3) consiste en :

- un prétraitement de la biomasse par torréfaction ou pyrolyse ;
- une gazéification pour convertir la biomasse en gaz de synthèse, mélange de monoxyde de carbone (CO) et d'hydrogène (H<sub>2</sub>) ;
- une purification du gaz de synthèse pour éliminer les impuretés résiduelles provenant de la biomasse, et capter le dioxyde de carbone ;
- une synthèse Fischer-Tropsch, qui permet de produire les carburants de synthèse à partir de CO et d'H<sub>2</sub> ;
- une étape finale de raffinage pour éliminer les oléfines et les oxygénés, puis craquer et isomériser les paraffines pour obtenir un kérosène répondant à la spécification ASTM D7566.

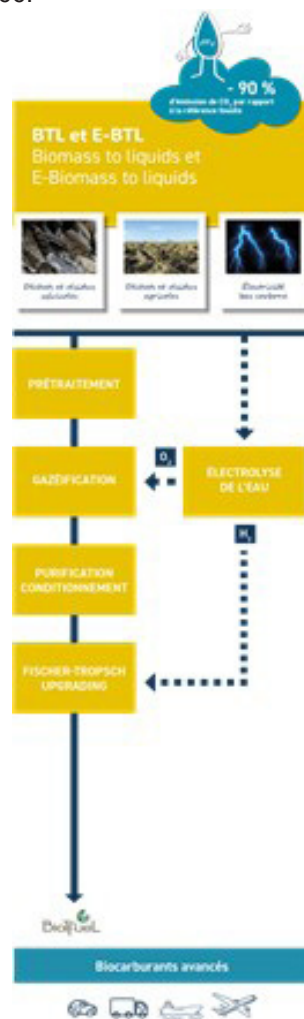


Figure 3 : Schéma de production de biocarburants par voie BTL ou e-BTL (Source : IFPEN).

Le rendement matière de ce procédé est d'environ 20 % pour la voie BTL et 40 % pour la voie e-BTL (Bournay *et al.*, 2016).

En France, le projet BioTJet porté par Elyse Energy vise à construire et opérer une unité industrielle française de production de e-biokérosène avancé par voie

thermochimique, à partir d'un large spectre de biomasses lignocellulosiques locales. Ce projet, soutenu par l'ADEME, repose sur la combinaison du procédé BioTfuel®, développé à IFPEN avec Avril, Axens, le CEA, TotalEnergies et ThyssenKrupp Uhde, avec l'injection d'hydrogène obtenu par électrolyse de l'eau. L'ajout d'hydrogène permet en effet de maximiser l'usage du carbone biogénique, et donc la quantité de kérosène obtenu. Implantée sur le bassin de Lacq, cette usine devrait fournir 75 kt par an de CAD à horizon 2028.

### À partir de CO<sub>2</sub> et d'électricité bas carbone (électro-carburants ou e-fuels)

Les premiers électro-carburants (*e-fuels*) seront également produits à partir de 2030. Ils sont fabriqués à partir d'hydrogène bas carbone produit par électrolyse de l'eau et de CO<sub>2</sub>, et cette voie est soutenue par l'initiative européenne "ReFuelEU Aviation", qui introduit dès 2030 un sous-mandat d'incorporation spécifique aux électrocarburants de 1,2 % et de 35 % en 2050.

Les différentes étapes de production d'électro-carburants (voir la Figure 4) consistent en :

- un captage du CO<sub>2</sub> fossile ou biogénique ;
- une conversion du CO<sub>2</sub> capté en CO par le procédé de Reverse Water Gas Shift au moyen d'un apport d'hydrogène bas carbone obtenu par électrolyse de l'eau ;
- une synthèse Fischer-Tropsch et de raffinage similaire à la voie BTL.

Le rendement matière de ce procédé est d'environ 30 %<sup>9</sup>.

En Europe, cinq projets industriels sont en phase d'étude d'ingénierie parmi lesquels le projet Take Kair, situé en Pays de la Loire et réunissant EDF, Holcim, IFPEN et Axens.

### À partir de biomasse lignocellulosique, par la voie biochimique

Une quatrième voie, la voie Ethanol-To-Jet, consiste à produire des CAD à partir d'éthanol ou d'éthanol avancé en Europe (issu de biomasse lignocellulosique), en biokérosène.

Le procédé (voir la Figure 5) consiste en :

- une étape de production d'éthanol avancé à partir de biomasse lignocellulosique : après une phase de prétraitement, les sucres présents dans la biomasse sont extraits par l'action d'enzymes, puis sous l'effet de levures fermentées en éthanol ;
- cet éthanol est ensuite déshydraté en éthylène ;
- l'éthylène est ensuite recombinaison par oligomérisation pour obtenir la longueur de chaîne carbonée compatible avec l'application kérosène ;

<sup>9</sup> <https://www.ifpenouvelles.fr/article/tout-savoir-les-carburants-synthese-e-fuels>

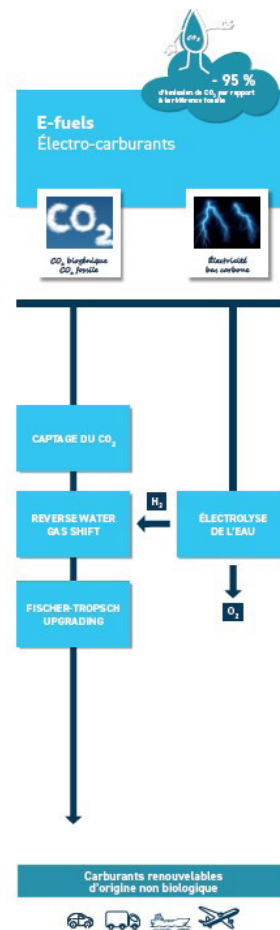


Figure 4 : Schéma de production des électro-carburants ou *e-fuels* (Source : IFPEN).

- une dernière étape d'hydrogénation permet d'ajuster la qualité du produit pour satisfaire la spécification de l'ASTM D7566.

Le rendement matière de ce procédé est d'environ 15 %.

Un projet industriel français d'unité de production d'éthanol avancé basé sur la technologie FuturoI®, développée dans le cadre d'un projet collaboratif ayant réuni onze partenaires de la recherche, de l'industrie et de la finance, est en phase d'étude d'ingénierie.

L'avantage des carburants produits par ces différentes technologies est qu'ils peuvent être mélangés directement avec le kérosène fossile : ils sont dits "drop-in". Leur composition chimique, proche de celle du kérosène fossile, permet de les incorporer sans risquer de détériorer les performances des turboréacteurs, mettre en question la sécurité des vols, ou nécessiter une modification des réseaux de transport, de stockage et de distribution. Ces carburants répondent à la spécification ASTM D7566, qui limite aujourd'hui leur taux d'incorporation avec le kérosène fossile à 50 %<sup>10</sup>. Des travaux de recherche sont en cours afin de pouvoir augmenter le taux d'incorporation des CAD jusqu'à 100 %.

<sup>10</sup> Le kérosène fossile contient des composés aromatiques qui assurent des propriétés liées à l'auto-inflammation, à la lubrification ou au gonflement des joints polymères permettant l'étanchéité des circuits hydrauliques. C'est une contrainte à respecter.

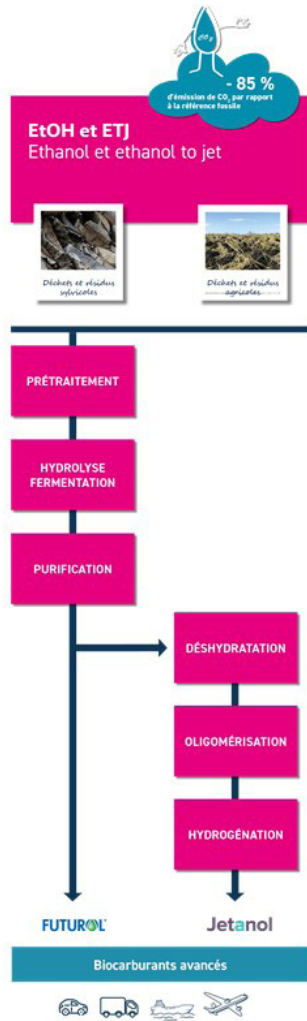


Figure 5 : Schéma de production de l'Ethanol-To-Jet (Source : IFPEN).

## Les bioraffineries, des unités multiproduits intégrées à l'écosystème local

Le développement de tous ces projets est conduit en concertation avec les territoires, du fait des multiples enjeux locaux : proximité avec la ressource, développement de filières de bioéconomie prenant en compte les évolutions des pratiques agricoles et sylvicoles, impact du changement climatique sur les cultures et les écosystèmes. Les filières d'approvisionnement en biomasse doivent s'organiser, se structurer et se déployer. L'implantation des unités industrielles permettra également de redynamiser l'activité et l'emploi local (direct et indirect).

Ces unités industrielles constitueront de véritables *hubs* énergétiques fournissant différents produits pour différents usages :

- du biogaz pour l'industrie ou les particuliers par réinjection dans le réseau actuel ;
- du CO<sub>2</sub>, pouvant être valorisé en électro-carburants ou dans l'industrie alimentaire ;

- de la lignine comme source d'énergie ;
- du naphta pour la chimie verte et la production de polymères ou pour le secteur du transport terrestre ;
- du gazole pour les secteurs du transport terrestre et maritime.

## Des enjeux de R&I et de mesure de l'impact environnemental des CAD

Quel que soit leur niveau de maturité, ces différentes filières nécessitent des efforts de recherche et innovation pour répondre aux enjeux de demain :

- diversifier les charges utilisées avec la transformation de ressources toujours plus variées telles que les déchets ménagers ou le CO<sub>2</sub> atmosphérique ;
- diminuer les coûts des unités industrielles via une meilleure intégration des procédés et le développement de nouvelles technologies de rupture ;
- réduire la consommation d'utilités ;
- améliorer les rendements matières pour mieux valoriser la ressource ;
- optimiser les rendements vers les produits d'intérêts, notamment le kérosène.

Afin de mesurer la contribution positive des CAD à la décarbonation du secteur aérien et plus largement à la réduction de son impact environnemental, il est indispensable de réaliser des analyses de cycle de vie multi-étapes (tout au long du processus de fabrication du carburant) et multicritères (émissions de gaz à effet de serre, consommation d'eau, impact sur les sols, polluants, etc.). Ces analyses permettent non seulement d'évaluer mais aussi de comparer les solutions technologiques entre elles dans un contexte donné, et en considérant leur bénéfice environnemental global. La réglementation européenne impose des critères de durabilité aux producteurs de biocarburants et de e-carburants, avec notamment un seuil minimum de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> tout au long de la chaîne :

- une réduction au minimum de 65 % pour les nouvelles unités de production de biocarburants avancés ;
- une réduction au minimum de 70 % pour les e-carburants par rapport à la référence fossile.

D'autres critères de durabilité sont aussi à respecter : ils concernent le changement d'usage des sols, l'effet sur la biodiversité, la préservation du stock de carbone...

L'impact potentiel sur la ressource en eau doit également être pris en compte. La consommation d'eau doit être minimisée tout au long de la chaîne. De ce point de vue, les biocarburants de seconde génération produits à partir de déchets et résidus présentent un avantage certain, la ressource ne nécessitant pas d'apport en eau supplémentaire.

## Références

ADEME (2022), « Élaboration de scénarios de transition écologique du secteur aérien », rapport, septembre.

IEA (2023), "Net zero roadmap a global pathway to keep the 1.5°C goal in reach", update.

STARK L. *et al.* (2016), "Production of Hydroprocessed Esters and Fatty Acids (HEFA) – Optimisation of process yield", OGST, 71(1), janvier-février, <https://ogst.ifpenergiesnouvelles.fr/articles/ogst/pdf/2016/01/ogst120241.pdf>

BOURNAY L. *et al.* (2016), « Production de biokérosène et de biogazole par la voie thermochimique », *Techniques de l'Ingénieur*, mai, <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/innovation-th10/innovations-en-energie-et-environnement-42503210/production-de-biokerosene-et-de-biogazole-par-la-voie-thermochimique-in303/>