

ReFuel EU Aviation et les SAF : il faut à présent mobiliser les ressources en biomasse et en électricité nécessaires

Avec l'adoption du règlement ReFuelEU Aviation, l'Union européenne a défini une trajectoire de déploiement des carburants d'aviation durables (*sustainable aviation fuels*, SAF), avec un objectif de 70 % de SAF en 2050, dont 35 % sous forme de carburants renouvelables d'origine non biologique. Il s'agit à présent de mettre en place une stratégie industrielle permettant de produire en quantité suffisante ces SAF. Mais il faut pour cela disposer des ressources de base nécessaires, en biomasse et en électricité...

Jean-Pierre Hauet,
président du Comité scientifique
d'Équilibre des Énergies

En route pour Fit for 55

L'Union européenne s'est engagée dans un programme ambitieux visant à atteindre la neutralité climatique d'ici 2050. Pour l'aviation, deux textes retiennent l'attention :

- le système européen d'échange de quotas d'émission (EU-ETS), qui fixe un calendrier de suppression rapide des quotas gratuits de CO₂ pour l'aviation ;
- le règlement ReFuelEU Aviation qui impose d'accroître l'utilisation des carburants durables pour l'aviation (SAF) en fixant des mandats d'incorporation de SAF passant de 2 % en 2025 à 6 % en 2030, 20 % en 2035, 34 % en 2040, 42 % en 2045 et 70 % en 2050.

La décarbonation du secteur aérien est plus difficile que celle des secteurs du transport routier et du bâtiment, mais elle est possible. Les avancées nouvelles dans la conception des avions, les progrès dans la gestion du trafic et surtout le développement des carburants durables permettront au secteur de l'aviation de mettre un terme à sa dépendance aux combustibles fossiles.

Mais les SAF sont aujourd'hui disponibles en très faibles quantités et sont de trois à huit fois plus chers que le kérosène conventionnel. Il faut donc développer les infrastructures pour les produire et les acheminer, s'assurer que les ressources en biomasse et en électricité

bas-carbone nécessaires à leur production seront disponibles et en premier lieu évaluer ces quantités.

Tel est l'objet de la présente étude, menée avec le concours de l'ONERA.

Différents types de SAF nécessitant différents types de matières premières

Le projet initial de règlement ReFuelEU reconnaissait trois types de SAF :

- **les biocarburants produits par voies conventionnelles (typiquement les HEFA)** à partir d'huiles de cuisson usagées ou de graisses animales classées à l'annexe IX, partie B, de la directive RED II. La filière des HEFA est la voie la moins coûteuse et a l'avantage d'être industriellement mature. Mais la disponibilité des ressources en biomasse conformes aux exigences de la directive RED est un facteur limitatif important ;
- **les biocarburants avancés**, produits à partir de matières classées à l'annexe IX, partie A, de la directive RED : biomasse lignocellulosique (résidus agricoles ou forestiers, matériaux herbacés), algues, déchets biologiques. Les biocarburants avancés peuvent être produits par la voie de la gazéification suivie de réactions Fischer-Tropsch (FT) ou par celle de l'*Alcohol-to-Jet*

(AtJ). Ces filières sont actuellement au stade de la démonstration.

- **les carburants synthétiques renouvelables pour l'aviation** (Power-to-Liquid fuels ou e-fuels), produits par conversion en CO de ressources en CO₂, suivie de réactions Fischer-Tropsch avec injection d'hydrogène bas-carbone produit par électrolyse de l'eau. Pour que la filière soit décarbonée, le CO₂ peut être soit capturé à partir des procédés thermiques utilisant la biomasse (BECCS), soit directement capturé à partir de l'air (DAC).

Au cours de la phase de négociation du règlement, le champ d'application des carburants reconnus comme SAF a été élargi en prenant en compte :

- **les biocarburants autres que ceux produits à partir des ressources énumérées à l'annexe IX**, partie A ou B, de la directive RED II, à l'exception des biocarburants produits à partir de cultures destinées à l'alimentation humaine et animale, sous réserve de certains critères de durabilité et dans la limite de 3 % dans le calcul de la part des SAF dans les carburants d'aviation ;
- sous certaines conditions, **les carburants d'aviation à base de carbone recyclé**, en utilisant le CO₂ capturé à partir de processus industriels ;



- **l'hydrogène pour l'aviation**, renouvelable ou bas-carbone, qui n'est pas considéré stricto sensu comme un SAF mais est pris en compte dans le calcul de la part des SAF dans les carburants d'aviation.

Dans cet article, par souci de simplification, nous adoptons une classification légèrement différente et distinguons :

- **les biocarburants :**
 - **les biocarburants conventionnels produits par la filière HEFA ;**
 - **les biocarburants avancés, appelés BtL (Biomass to Liquid)**, produits par la filière FT à partir des ressources énergétiques énumérées dans la partie A de l'annexe IX de la directive RED II.
- Les AtJ ne sont pas pris en compte car, lorsqu'ils sont utilisés sur des matières premières lignocellulosiques, leur rendement est limité.
- **les PtL (Power to Liquid)**, c'est-à-dire les carburants liquides synthétiques qui peuvent être produits dans une phase transitoire à partir de carbone recyclé et qui pourront être issus, à l'avenir, de carbone directement capturé dans l'air (DAC).
- **les e-BtL**, dérivés de la filière FT, où de l'hydrogène est injecté après la phase de gazéification de la biomasse afin de permettre d'atteindre l'équilibre stœchiométrique des réactions Fischer-Tropsch et d'augmenter la quantité de biocarburants produits. Les e-BtL sont

un compromis entre les BtL et les PtL.

- **l'hydrogène pour l'aviation.**

Trois scénarios pour décarboner les carburants

Cette note examine trois scénarios dans le but de déterminer les quantités de SAF qui seront nécessaires jusqu'en 2050 et la quantité de ressources amont (biomasse et électricité) qui seront requises.

Ces scénarios, reposant sur un modèle mis au point par l'ONERA, sont les suivants :

- **le scénario 1 (REFuelEU)** correspond au respect de la trajectoire du règlement ReFuelEU conduisant à 70 % de SAF en 2050 avec un minimum de 35 % de carburants synthétiques pour l'aviation à cet horizon ;
- **le scénario 2 (RefuelEU with e-BtL)** poursuit le même objectif mais repose beaucoup plus largement sur le développement de la filière e-BtL, afin de limiter les besoins en biomasse ;
- **le scénario 3 (85% of SAF in 2050)** reprend l'hypothèse avancée par la Parlement européen durant la phase de négociation du texte, de 85 % de SAF en 2050. Comme le scénario 2, ce scénario s'appuie largement sur le développement des e-BtL.

Ces scénarios ont été appliqués à la zone UE des 27. Ils tiennent compte de l'évolution prévisionnelle du trafic régional, court, moyen et long courrier et de toutes les mesures qui contribueront à la réduction des émissions de CO₂ :

- renouvellement des flottes actuelles avec des avions de dernière génération (basé sur la durée de vie moyenne des avions de 20 ans) ;
- à partir de 2035, arrivée d'une nouvelle génération d'avions permettant de réduire les émissions de 20 à 30 % ;
- optimisation des opérations (trafic aérien et exploitation des aéroports) ;
- émergence d'avions à l'hydrogène (H₂) à partir de 2035/40 ;
- incorporation d'un pourcentage croissant de SAF.

Scénario 1 : REFuelEU

Le scénario 1 est cohérent avec ReFuelEU : 70 % de SAF en 2050 (dont 35 % de BtL et HEFA et 35 % de PtL). La filière des HEFA est censée atteindre rapidement un plateau de 2,5 Mt. La filière BtL inclut l'AtJ et le Gas-FT mais l'AtJ n'est pas censé se développer de manière significative. L'e-BtL est comptabilisé pour zéro. En outre, l'hydrogène est censé couvrir 9,6 % des besoins en énergie (*tableau 1 et figures 1 à 3*).

Les émissions de CO₂ directement rattachées au secteur aérien évoluent conformément à la figure 3. Il en ressort qu'il restera en 2050 un volume d'émissions correspondant à 17 % d'émissions tendancielle qu'il faudra compenser par d'autres moyens.

Ce scénario 1 exige une quantité croissante de biomasse au cours des premières décennies. Ensuite, en raison de l'émergence de la filière PtL, l'électricité

Tab. 1 : Hypothèses principales du scénario 1 pour 2050.

Scen 1 - 2050	Y compris H ₂	Jet fuels seulement
BtL & HEFA	31,6 %	35,0 %
e-BtL	-	-
PtL	31,6 %	35,0 %
Kero	27,1 %	30,0 %
Sous-total	90,3 %	100,0 %
Hydrogène	9,6 %	
Total	100,0 %	

...

Fig. 1 : Scénario 1 – Répartition entre les carburants (sans l'hydrogène).

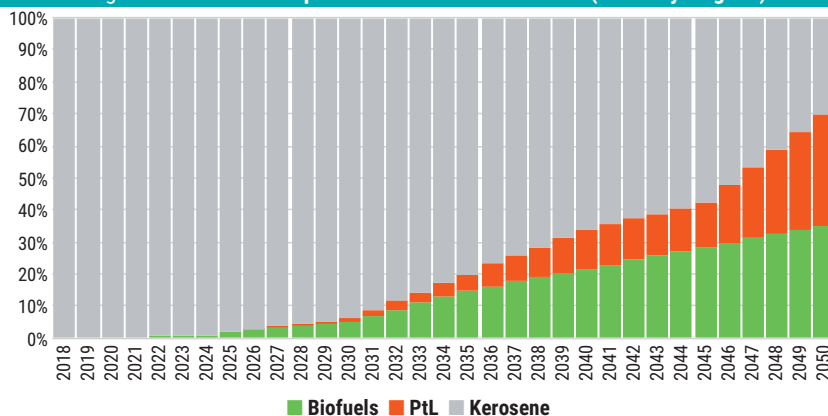
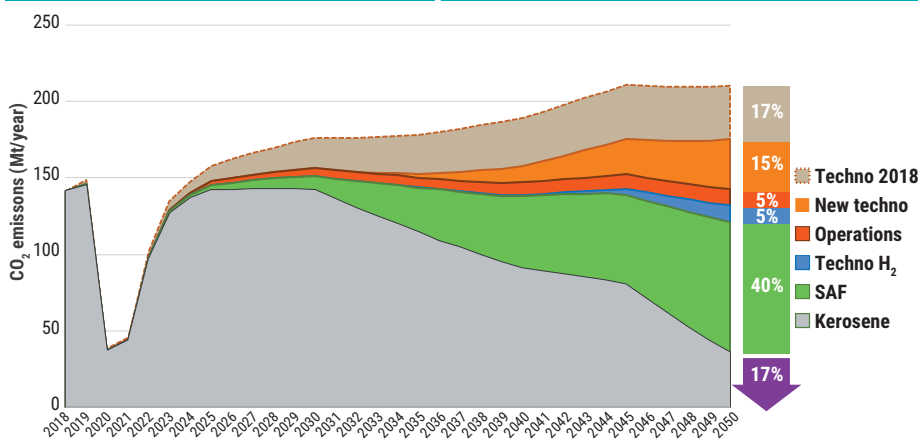
Fig. 3 : Évolution des émissions de CO₂ du secteur de l'aviation dans le scénario 1.

Fig. 4 : Ressources énergétiques nécessaires dans le scénario 1 (biomasse et électricité).

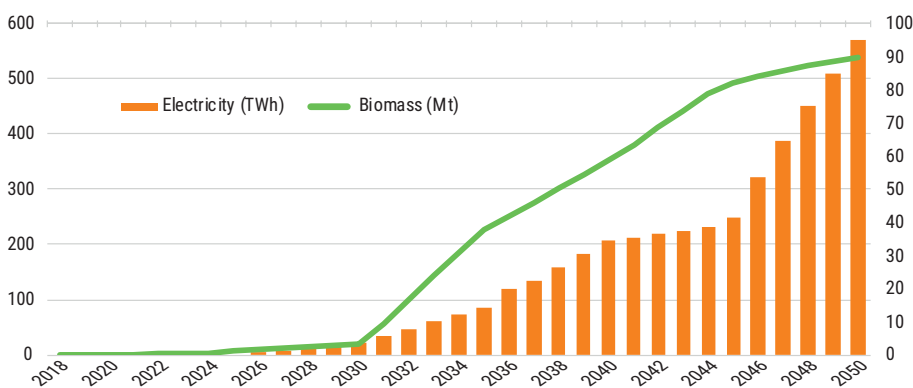
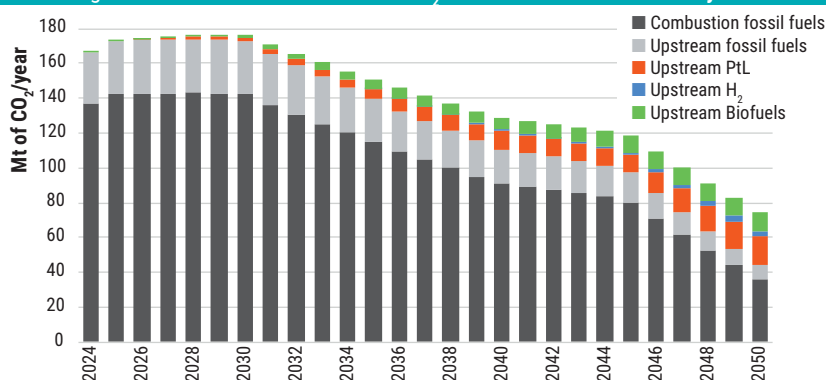
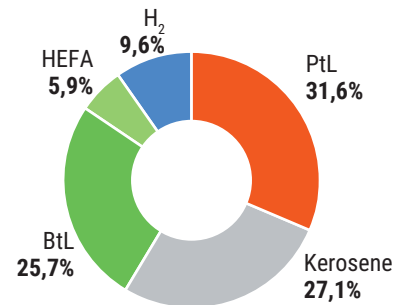
Fig. 5 : Évolution des émissions de CO₂ dans le scénario 1 dans le cycle de vie.

Fig. 2 : Scénario 1 - Répartition entre les carburants en 2050 (y compris l'hydrogène).



bas-carbone prend le relais (figure 4). Les quantités de biomasse et d'électricité nécessaires sont reprises dans le tableau 2. Ces quantités s'élèvent respectivement à 90,0 Mt pour la biomasse et à 570,1 TWh pour l'électricité en 2050.

Les émissions amont associées à la production de SAF doivent également être prises en compte. Il est notamment essentiel que l'électricité devienne bas-carbone, afin d'accroître l'efficacité de la conversion et de réduire toutes les émissions dues à la production et au transport des SAF (figure 5).

Scénario 2 : ReFuelEU avec e-BtL

Le scénario 2 est basé sur le même objectif de décarbonisation que le scénario 1 (70 % de la SAF en 2050), mais il s'appuie davantage sur l'e-BtL afin de réduire les besoins en ressources énergétiques issues de la biomasse par rapport au scénario 1.

Les émissions de CO₂ à compenser en 2050 restent très proches de 16/17% des émissions tendanciellées. Mais les quantités de biomasse sèche nécessaires en 2050 sont ramenées à 56,2 Mt tandis que la quantité d'électricité bas-carbone exigée est portée à 711 TWh, c'est-à-dire 21 % de la production actuelle d'électricité dans l'UE27.

Scénario 3 : 85 % de SAF en 2050

Le scénario 3 est basé sur le même scénario de décarbonisation que le scénario 2, mais en visant une proportion de 85 % de SAF en 2050.

Les émissions de CO₂ qui doivent être compensées par d'autres mesures ou par des puits de carbone en 2050 sont alors ramenées à 8 % des émissions

tendanciennes. Mais la quantité de biomasse sèche nécessaire en 2050 est portée à 176,9 Mt et la quantité d'électricité nécessaire est de 804,1 TWh (soit 24 % de la production annuelle actuelle d'électricité de l'UE27).

Les ressources nécessaires seront-elles disponibles ?

Le tableau 2 résume l'évolution des quantités de biomasse et d'électricité qui seront nécessaires dans chacun des scénarios.

On voit que les trois scénarios nécessitent de grandes quantités de biomasse et d'électricité.

Biomasse

L'évaluation des ressources accessibles est très complexe. De nouvelles cultures énergétiques peuvent apparaître, mais l'aviation est en concurrence avec d'autres secteurs (énergie, transports routiers et maritimes). Certains acteurs environnementaux estiment également que les déchets agricoles ou forestiers devraient être laissés en place.

Les ressources de la filière HEFA seront limitées en Europe à 2,8 ou 3,1 Mt. Par conséquent, la production du SAF nécessitera dans le scénario 1, selon l'analyse d'impact de la Commission européenne, environ 11 % du potentiel disponible de l'UE en résidus agricoles et déchets de bois, 3,0 % du potentiel disponible en produits et résidus forestiers, et 9,4 % du potentiel disponible en cultures énergétiques¹. Notre évaluation conduit à des estimations 50 % plus

élevées, en tenant compte de la biomasse requise par les coproduits des SAF.

Basée sur plusieurs études (Material Economics², The Royal Society³, Académie des Technologies⁴), la vision de la Commission européenne semble optimiste, même si l'autorisation d'utiliser des graisses animales de catégorie 3 apporte une certaine flexibilité,

Dans son étude réalisée pour le compte du Concawe⁵, l'Imperial College est plus positif mais les résultats sont considérés par de nombreux spécialistes comme trop optimistes et l'Imperial College reconnaît que « même si le potentiel est là, il faudrait développer la chaîne d'approvisionnement pour mobiliser toutes ces ressources ». En effet, les ressources en biomasse n'augmenteront probablement pas et la disponibilité des ressources n'est pas le seul problème, car elles doivent également être collectées dans des conditions environnementales et économiques acceptables. Les quantités de biomasse pouvant être collectées dans le scénario 1 sont très probablement un maximum absolu et la Commission européenne elle-même reconnaît que le développement des SAF signifie « une concurrence accrue entre les secteurs de l'économie pour l'accès aux ressources énergétiques ».

Electricité

Les quantités d'électricité nécessaires en 2050 dans le scénario 1 (570 TWh) et dans le scénario 2 (710 TWh) représentent respectivement 17 % et 21 % de la production actuelle d'électricité en Europe (3 371 TWh en 2018).

Ces besoins sont très importants, même en tenant compte des améliorations possibles de l'efficacité des procédés. Mais l'électricité permettra de compenser la disponibilité limitée des ressources en biomasse.

Le développement des PtL, notamment basé sur la capture du carbone dans l'air, nécessitera de grandes quantités d'énergie. La chaleur pourra provenir de la synthèse FT, mais l'électricité bas-carbone devra encore être produite.

Afin de garantir la disponibilité d'une quantité suffisante d'électricité bas-carbone, il est nécessaire de planifier à l'avance le développement de moyens de production adéquats, probablement un mix d'énergies renouvelables et de nouvelles centrales nucléaires.

Sans ces investissements, l'Europe devrait importer massivement des SAF de pays tiers, ce qui soulèverait des questions politiques et stratégiques quant à l'indépendance énergétique de l'Europe.

Conclusions

Les résultats qui précèdent conduisent aux recommandations suivantes :

- en ce qui concerne la biomasse, compte tenu des ressources disponibles limitées, le scénario 2 (associé à une consommation plus réduite de biomasse et à une utilisation accrue d'électricité) devrait être privilégié ;
- le secteur de l'aviation devrait être priorisé pour l'utilisation des ressources de biomasse, car la plupart des autres secteurs ont accès à d'autres solutions, telles que l'électrification directe, pour leur décarbonation ;
- afin de garantir une quantité d'électricité bas-carbone suffisante, il est nécessaire de planifier à l'avance le développement de moyens de production adéquats, probablement un mix d'énergies renouvelables et de nouvelles capacités nucléaires. ●

Remerciements

Équilibre des Énergies remercie M. Xavier Vancassel de la Direction scientifique et prospective de l'ONERA, pour sa contribution précieuse à ce projet. M. Vancassel a utilisé les modèles développés par l'ONERA pour réaliser les calculs utilisés dans chacun des scénarios.

Tab. 2 : Synthèse des trois scénarios. Ces données comprennent les quantités directement associées à la production de SAF mais aussi les quantités liées aux coproduits (naphta).

	Scénario 1 (ReFuelEU)		Scénario 2 (ReFuelEU avec e-BtL)		Scénario 3 (SAF 85 % en 2050)	
Biomasse 	2030	3,2 Mt	2030	4,0 Mt	2030	4,0 Mt
	2035	37,8 Mt	2035	32,7 Mt	2035	32,7 Mt
	2040	58,8 Mt	2040	43,7 Mt	2040	43,7 Mt
	2050	90,0 Mt	2050	56,2 Mt	2050	76,9 Mt
Électricité 	2030	21,4 TWh	2030	24,4 TWh	2030	24,4 TWh
	2035	85,8 TWh	2035	117,4 TWh	2035	117,4 TWh
	2040	206,4 TWh	2040	280,5 TWh	2040	280,5 TWh
	2050	570,1 TWh	2050	710,7 TWh	2050	804,1 TWh

1. Communication COM(2021) 561 final 14/07/2021 (page 41).

2. <https://materialeconomics.com/latest-updates/eu-biomass-use>

3. <https://royalsociety.org/-/media/policy/projects/net-zero-aviation/net-zero-aviation-fuels-policy-briefing.pdf>

4. <https://www.academie-technologies.fr/wp-content/uploads/2023/03/Rapport-decarbonation-secteur-aerien-production-carburants-durables-AT-Mars-2023.pdf>

5. <https://www.concawe.eu/publication/sustainable-biomass-availability-in-the-eu-to-2050/>