

DES CARBURANTS DURABLES POUR L'AVIATION

Patrick Ledermann et Daniel Iracane

Membres de l'Académie des technologies

Séance du 25 janvier 2023

En collaboration avec l'Académie de l'air et de l'espace

Résumé

L'engagement pris par 193 États membres de l'Organisation de l'Aviation civile internationale en faveur de la neutralité carbone du transport aérien à l'horizon 2050 ne pourra être tenu qu'en recourant à des carburants durables. Ces carburants sont compatibles avec les infrastructures et aéronefs existants et peuvent d'ores et déjà être utilisés. Leur production nécessitera de lourds investissements.

IFPEN a développé différentes technologies de production de SAF. Le nombre de projets industriels, qui reste faible aujourd'hui, augmentera avec la stabilisation du cadre réglementaire et fiscal, et du fait de l'engagement croissant des acteurs de l'énergie et de l'aéronautique.

Compte tenu de la disponibilité limitée de la biomasse, les besoins en carburant durable seront couverts en majorité par la production de kérosène de synthèse dès la prochaine décennie. Du fait de son mix électrique décarboné, la France est un des rares pays à pouvoir considérer le déploiement rapide sur son territoire d'une filière industrielle pour la production de SAF au-delà des limites imposées par la disponibilité de la biomasse.

Intervenants

Xavier Bouis

Président de la commission « Énergie et environnement » de l'Académie de l'air et de l'espace

Nicolas Jeuland

Expert carburant à SAFRAN

Jean-Christophe Viguié

Responsable du programme « Biomasse vers carburants » à l'IFP Énergies Nouvelles

Sommaire

Le rôle des SAF dans la décarbonation de l'aérien	2
Les technologies de production de biocarburants pour l'aviation	3
Résultats de l'étude menée par l'Académie des technologies	5
Débats	7

Introduction

Patrick Ledermann : Il y a un an, le pôle Énergie a créé un groupe de travail sur les carburants durables pour l'aviation, ou SAF (*sustainable aviation fuels*). Outre leur contribution à la décarbonation du transport aérien, l'un des intrants essentiels des SAF, qu'il s'agisse de biocarburants ou de carburants de synthèse, est l'hydrogène, ce qui représente une opportunité pour notre pays, doté d'un mix électrique permettant de produire de l'hydrogène décarboné. Le développement de la filière des SAF pourrait ainsi contribuer à la réindustrialisation de la France.

Xavier Bouis : L'Académie de l'air et de l'espace, fondée en 1983, s'intéresse depuis une douzaine d'années au transport aérien durable et a publié deux rapports, *Comment volerons-nous en 2050 ?* et *Transport aérien en crise et défi climatique*, publiés respectivement en 2013 et en 2021. Depuis un an, elle s'est dotée d'une commission sur l'Environnement dont les 58 membres sont issus de 7 pays européens.

Au bout d'un an de travail au sein de cette commission, nous sommes convaincus que des solutions techniques existent pour décarboner le transport aérien tout en maintenant un prix des billets non dissuasif. Ce secteur et beaucoup de ceux qui devront quitter les énergies fossiles très majoritaires dans le mix énergétique français actuel nécessiteront des investissements considérables dans les énergies renouvelables, ce qui posera un problème d'acceptabilité sociale, car notre pays va devoir multiplier éoliennes et panneaux solaires, sans parler des nouvelles centrales nucléaires à construire. Moyennant ces efforts, la France est cependant bien placée pour viser l'indépendance publics.

L'engagement pris par 193 États membres de l'Organisation de l'Aviation civile internationale en faveur de la neutralité carbone du transport aérien à l'horizon 2050 repose sur quatre piliers indissociables et complémentaires : recours à des carburants aéronautiques durables (biocarburants, e-Fuels, carburants hybrides, hydrogène), progrès technologiques (réduction de la consommation, avion à hydrogène...), optimisation des opérations aériennes (éviter que les avions attendent en bout de piste avant de décoller ou tournent au-dessus de l'aéroport avant d'atterrir, améliorer les plans de vol...) et enfin compensation des émissions résiduelles, car il sera impossible de décarboner l'aviation à 100 %, ce volet de compensation devant cependant n'être activé qu'en dernier recours, afin de boucler les quelques % restant.

Au cours des trois dernières années, un grand nombre d'études ont été publiées sur les trajectoires de décarbonation, avec des hypothèses très variées sur la croissance du trafic, la pénétration des nouvelles technologies ou le soutien public apporté au déploiement des filières. Toutes ces études partagent cependant une même conclusion : sans un déploiement immédiat et massif des carburants durables, l'objectif de décarbonation ne pourra être atteint.

Les carburants de substitution

Les carburéacteurs (carburants pour turbomachines aéronautiques) sont des produits très spécifiques, présentant des propriétés extrêmes en termes de contenu énergétique, de tenue à froid, de stabilité thermique ou encore de compressibilité. Ils doivent être compatibles avec des technologies très différentes, car ils alimentent aussi bien des petits avions que des courts, moyens et longs courriers, des hélicoptères, des aéronefs militaires, etc. La réplique de ces propriétés avec des carburants de substitution est très complexe.

Fabriqués à partir de divers types de biomasse, ou à partir de carbone et d'hydrogène, les carburants de substitution se répartissent en deux catégories : les *drop-in*, compatibles avec les infrastructures et aéronefs existants et donc utilisables à court terme ; les *non drop-in*, dont les propriétés diffèrent de celles d'un carburéacteur classique, et qui nécessitent donc de nouveaux aéronefs, une nouvelle logistique et donc potentiellement de lourds investissements. En conséquence, les *non drop-in* ne pourront être commercialisés qu'à moyen et long terme après avoir démontré que les bénéfices engendrés sont à même de justifier ces complexités et investissements. Les uns et les autres doivent être développés en parallèle, car aucun d'entre eux n'est susceptible de remplacer le kérosène dans tous ses usages.

Pour le moment, sept filières de carburants de substitution ont été certifiées. Compte tenu de la rareté



Le rôle des SAF dans la décarbonation de l'aérien

Nicolas Jeuland

Nicolas Jeuland est expert carburant à SAFRAN, membre associé de l'Académie de l'air et de l'espace, et ancien responsable du département « Carburants, lubrifiants et émissions polluantes » de l'IFP.

de la ressource biomasse, il est indispensable d'exploiter au mieux cette dernière. Or, toutes les filières ne sont pas équivalentes en termes de rendement énergétique, de coût, ou encore de disponibilité. De plus, certains procédés permettent la production de SAF, mais également d'autres produits tels qu'essences, gazoles, bio-GPL, etc.

Les carburants de substitution sont déjà utilisés dans les transports aériens. En 2022, la production s'est élevée à 300 millions de litres et, depuis 2016, plus de 450 000 vols ont été assurés avec des carburants incluant jusqu'à 50 % de SAF.

Et l'hydrogène ?

L'hydrogène est au cœur de la décarbonation de l'aérien, à la fois pour la production de bioSAF (finition par hydrocraquage et hydroisomérisation), l'optimisation du rendement de production de la biomasse à travers les e-bioSAF, la fabrication d'e-Fuels par combinaison avec le CO₂, ou encore comme carburant sous forme liquide ou gazeuse.

En tant que carburant, l'hydrogène ne pourra être utilisé que pour des courts et moyens courriers car, pour des raisons d'encombrement des réservoirs et de complexité d'utilisation, on n'envisage pas d'y recourir pour des longs courriers. Imaginer que l'aviation pourrait, à terme, fonctionner à 100 % avec l'hydrogène est donc un leurre. Il n'y a donc aucune compétition entre les biocarburants et l'hydrogène, ce dernier devant seulement être considéré comme un complément au déploiement des SAF.

Avantages et limites des différentes voies

Le secteur aérien est en train de passer d'une situation où un seul carburant servait à tous les usages, partout dans le monde et quel que soit le type d'aéronef, à une situation dans laquelle toute une variété de solutions coexisteront. De tout petits avions destinés à l'apprentissage, avec un rayon d'action réduit, pourront être entièrement électriques. Des avions un peu plus gros pourront fonctionner à l'hydrogène, avec des piles à combustibles ou des turbines à gaz. Enfin, les moyens et longs courriers (qui représentent actuellement entre 70 et 80 % des émissions de GES) recourront aux carburants durables. Aucune des différentes filières n'offre de solution miracle, chacune présentant des avantages et des inconvénients en termes de disponibilité à court et à long terme de la matière première, de coût, de synergie avec d'autres secteurs et avec l'outil industriel existant, de capitalisation sur ce qui existe déjà, etc.

Pour un plan d'action fort et coordonné

Le déploiement immédiat et massif des SAF est indispensable au respect des objectifs de décarbonation du transport aérien adoptés par les membres de l'Organisation de l'Aviation civile internationale. À l'horizon 2050, les besoins de l'aviation française sont évalués à 20 exajoules, soit 400 M de tonnes de SAF, ce qui représente cinq fois la production totale actuelle de biocarburants, tous secteurs confondus.

Il existe un risque extrêmement important que les ressources indispensables à l'aérien (biomasse et électricité décarbonée) ne soient pas disponibles en quantité suffisante à long terme, en raison de concurrences d'usages ou d'arbitrages politiques défavorables. Seul un plan d'action fort et coordonné, alliant R&T et influence, et couvrant le court comme le long terme, est à même d'assurer la disponibilité des SAF.



Les technologies de production de biocarburants pour l'aviation

Jean-Christophe Viguié

Jean-Christophe Viguié est responsable du programme « Biomasse vers carburants » à IFP Énergies Nouvelles (IFPEN), organisme public de recherche dans les domaines de l'énergie et des transports.

Les travaux de l'IFP Énergies Nouvelles (IFPEN) sur les biocarburants ont commencé au lendemain du choc pétrolier de 1973. Au départ, les différentes innovations ont été commercialisées par la direction industrielle de l'IFPEN puis, à partir de 2001, par sa filiale Axens. Dans les débuts, l'aviation n'était pas sa cible principale mais, au fil du temps, les procédés ont évolué pour s'adapter à ce secteur.

Les technologies développées par l'IFPEN

Les quatre grandes technologies que nous avons développées au cours des 15 dernières années sont, Futurol™ (production de bioéthanol avancé à partir de

biomasse lignocellulosique), BioTfuel® (production de biogazole et biokérosène avancés à partir de biomasse lignocellulosique), Vegan (production de biogazole et biokérosène à partir d'huiles végétales), et enfin Alcohol-to-Jet (production de biokérosène à partir d'alcool).

Les biocarburants avancés, dits aussi « biocarburants de deuxième génération », sont issus de matières végétales n'entrant pas en concurrence avec la production alimentaire (résidus agricoles, déchets forestiers, cultures dédiées). Compatibles avec les carburants actuels et avec tous types de moteurs, ils permettent une réduction importante des émissions de GES.

Depuis dix ans, nous avons réalisé différentes analyses de cycle de vie, notamment sur les véhicules routiers. Une automobile roulant pendant 150 000 kilomètres avec en moyenne 1,3 personnes à bord et fonctionnant avec 100 % de biodiesel de deuxième génération émet, depuis sa fabrication jusqu'à sa déconstruction, 42 grammes de CO₂ équivalents par personne et par kilomètre, contre 55 pour un véhicule 100 % électrique avec mix électrique français, et 70 pour un moteur thermique avec 85 % en volume de bioéthanol de deuxième génération.

En revanche, les biocarburants sont significativement plus onéreux que les carburants issus du pétrole.

Le développement de Futurol™ jusqu'à sa commercialisation a duré dix ans (2008-2018) et celui de BioTfuel®, 11 ans (2010-2021).

Axens compte désormais 3 000 références de licences de technologie (dans les domaines du raffinage, de la pétrochimie, des biocarburants, du gaz, du recyclage des plastiques...) en opération dans le monde. Ceci constitue un point fort, car un industriel souhaitant mettre en œuvre une technologie de production de SAF doit supporter un investissement de plusieurs centaines de millions d'euros, il doit pouvoir compter sur un partenaire technologique fiable afin de limiter son risque.

Un enjeu majeur pour le secteur aérien

Le transport aérien représente actuellement de l'ordre de 15 % des émissions de CO₂ liées aux transports. Le coût de revient des SAF est de trois à cinq fois supérieur à celui du kérosène, ce qui va renchérir le prix des billets et pourrait impacter la demande. Pour rappel, la demande en carburant pour aéronef (carburacteur) représente environ 300 millions de tonnes dans le monde, dont environ 7 millions de tonnes pour la France et environ 60 millions pour l'Europe. L'objectif de la Commission européenne est de substituer plus de 50% de cette demande par des SAF à l'horizon 2050.

Cela dit, avant cet horizon de 2050, il faut réussir à couvrir les besoins de 2030. Compte tenu du délai nécessaire pour qu'un carburant obtienne la certification mondiale ASTM D7566 et le temps de construction d'une usine, il est évident que les biocarburants qui seront utilisés en 2030 font partie des sept filières déjà certifiées à ce jour. Quatre d'entre elles peuvent permettre une production significative: *Fischer-Tropsch Synthesized Paraffinic Kerosene* (FT), *Hydroprocessed Esters and Fatty Acids* (HEFA), *Isobutanol and Ethanol to Jet Synthesized Paraffinic Kerosene* (ATJ), *Co-processing of renewable content with crude-oil derived middle distillates* (CoPro).

L'IFPEN a élaboré des procédés correspondant à chacune de ces quatre voies. Pour HEFA, il s'agit de Vegan, dont la licence est commercialisée depuis 2015, d'abord orientée pour du carburant routier cette technologie permet désormais de servir également le secteur aérien selon le souhait du client industriel. Pour la voie ATJ, elle semble se développer commercialement à partir d'éthanol conventionnel, aux États-Unis, et d'éthanol avancé en Europe avec une première licence concédée en Croatie de la technologie Futurol™. Le procédé de l'IFPEN correspondant à la voie FT est BioTfuel®, dont la démonstration a été réalisée avec cinq partenaires sur le site Bionext de Dunkerque, et dont la licence est désormais commercialisée par Axens. Dans le domaine des e-Fuels, produits à partir d'hydrogène et de CO₂, IFPEN développe une technologie avec solvant démixant permettant de capter le CO₂ sur des émetteurs industriels de manière relativement peu énergivore. Notre solution d'e-Fuel incorporant notre technologie de reverse water gas shift et notre technologie Fischer-Tropsch (Gasel™) sera commercialisable à la mi 2023.

À la recherche de synergies biocarburants et bioproduits

Certains craignent que, si l'on utilise de la biomasse pour produire des biocarburants, ce soit au détriment d'autres produits biosourcés. En réalité, les unités de production de SAF doivent être conçues comme des hubs multiproduits.

Par exemple, dans la technologie Futurol™, qui vise à produire de l'éthanol avancé à partir de biomasse lignocellulosique, la première étape de transformation, une hydrolyse acide, permet de produire des sucres 2G qui pourront être destinés à la fabrication de Bio-n-butanol, d'isopropanol de MEG... L'éthanol quant à lui pourra ensuite être utilisé dans des véhicules terrestres ou être déshydraté pour produire du bio-éthylène, une des molécules de base de la pétrochimie ou, grâce à la technologie BioButterfly développée avec Michelin, il pourra aussi être transformé en bio-butadiène et servir à la production de pneumatiques. L'oligomérisation et l'hydrogénation du bio-éthylène permettront d'en faire du SAF. La pétrochimie représente des volumes dix fois

moindres que ceux du raffinage, les produits biosourcés représenteront des volumes très inférieurs aux biocarburants mais leur couplage (biocarburant/biosourcés) au sein de biohubs permettra d'optimiser les coûts de transformation de la biomasse ce qui sera bénéfique aux biocarburants et aux molécules biosourcées.

Pour une structure publique/privée, France SAF

Axens est probablement la seule société dans le monde capable d'offrir un tel nombre de solutions technologiques pour produire des SAF. En revanche, on ne peut que déplorer le faible nombre de projets industriels concrets à l'heure actuelle, où que ce soit dans le monde.

Pour mener à bien de tels projets, plusieurs conditions doivent être réunies. Il faut disposer de technologies robustes, et c'est le cas en France ; d'une ressource biomasse fiable, domaine dans lequel notre pays est également bien placé ; d'un site industriel qui, pour faciliter l'acceptabilité sociale du projet, pourrait être trouvé dans la reconversion d'un site ancien ; d'un cadre réglementaire stable et d'une politique fiscale incitative (aide à l'investissement, fiscalité particulière sur les produits...) ; de marchés pour chaque produit afin de valoriser l'ensemble de la ressource et d'accroître la rentabilité du projet ; et enfin, et c'est ce qui manque le plus dans notre pays, de partenariats solides entre tous les acteurs de la filière.

La France a la chance de disposer d'une industrie aérienne très intégrée, avec un opérateur national puissant, des aéroports, des constructeurs d'avions, des constructeurs d'équipements, des sous-traitants. En revanche, la production d'énergie (développeurs de technologies et producteurs de carburants) reste complètement en dehors de cet écosystème, sans parler des producteurs de biomasse. Un industriel qui souhaite investir dans une unité de biocarburants doit travailler, en parallèle, à la structuration de son approvisionnement en biomasse, et ceci sur une durée au moins équivalente à celle de son emprunt. L'absence d'intégration de la filière est un frein à la multiplication de projets industriels dédiés à la production de SAF, chacun des acteurs se montrant attentiste.

C'est pourquoi, au risque de passer pour un iconoclaste ou un provocateur, je suggère la création d'une structure publique/privée, « France SAF », qui serait capable de prendre des risques auxquels les acteurs privés seuls ne peuvent pas forcément faire face (structuration de l'approvisionnement, risque réglementaire, nécessité d'un investissement massif, acceptabilité sociale des sites industriels...). Cette structure pourrait identifier des sites appropriés pour les projets industriels, piloterait la construction d'unités de production de SAF mais également de projets biomasse,

lèverait la dette, serait l'actionnaire majoritaire ou de référence de chaque projet industriel, signerait les contrats de licence, d'approvisionnement et d'*off-take* pour chaque site, puis céderait chaque asset industriel une fois mis en opération afin de réinvestir dans de nouveaux projets afin de viser à la massification de la production de SAF en France et permettre ainsi au pays de devenir un leader européen et mondial.



Résultats de l'étude menée par l'Académie des technologies

Daniel Iracane

Daniel Iracane est membre de l'Académie des technologies, ancien directeur adjoint de la division des affaires internationales du CEA puis directeur général adjoint de l'Agence pour l'énergie nucléaire de l'OCDE.

L'Académie des technologies a publié un rapport sur la décarbonation du secteur aérien par la production de carburants durables, dont je vais vous présenter les principaux résultats.

Nous sommes partis de deux grandes interrogations.

La première concerne l'adéquation entre la quantité d'intrants énergétiques disponibles (biomasse et électricité) et les besoins de carburants durables pour l'aviation. Ces besoins sont estimés, pour 2050, à 400 millions de tonnes de SAF par an, dont 10 millions de tonnes pour la France. L'essentiel de l'énergie nécessaire (85 %) est lié à l'électrolyse, qui est au cœur de la production de toutes les molécules énergétiques, dont l'hydrogène.

La deuxième grande interrogation porte sur le délai de mise en place d'une filière industrielle SAF en France : peut-elle monter suffisamment en puissance durant la période 2030-2040 pour être pleinement opérationnelle en 2050 ?

Le rôle initial des e-BioSAF

Les deux principales sources de biomasse mobilisables pour la production de bioSAF sont les huiles usées et la biomasse lignocellulosique (déchets agricoles et forestiers).

Les technologies à base d'huiles usées sont déjà matures mais, compte tenu des volumes disponibles, même en supposant que tous les véhicules routiers soient électrifiés et que les huiles usées soient réservées au transport aérien, cette voie ne permettra pas de répondre à plus de 4 % des besoins.

Le rendement de conversion de la seule biomasse lignocellulosique en carburant est de l'ordre de 50 %. Avec un ajout d'hydrogène, ce rendement peut s'approcher de 100%, ce qui maximise la valeur d'utilisation d'une biomasse très convoitée par de nombreux secteurs de l'économie. Cette voie permettrait de couvrir 20 % des besoins. Mais les incertitudes sont importantes, aussi bien sur la disponibilité de la biomasse en fonction de l'évolution des sols et du climat, que de la viabilité économique de la filière de collecte. Ainsi, pour produire 0,2 millions de tep d'e-BioSAF, il faut recueillir la biomasse sur un rayon de 100 kilomètres autour de l'unité de production. On ne pourra vraisemblablement pas implanter de nombreuses unités de ce type sur le territoire national. Enfin, la compétition des usages peut se traduire par des incertitudes législatives qui risquent de limiter les voies BioSAF et e-BioSAF.

Reste donc la voie e-SAF, consistant à fabriquer des carburants de synthèse à partir de carbone (extrait de l'air ou des rejets industriels) et d'hydrogène. Pour cela, il sera nécessaire d'augmenter très significativement la production d'électricité décarbonée d'ici 2050. En effet, la production d'1 million de tonnes d'e-SAF (soit 10 % des besoins français) nécessitera 37 TWh. Cela implique d'apporter à maturité les procédés industriels et de soigner leur intégration (par exemple la chaleur issue des procédés de type Fischer-Tropsch alimentera l'électrolyse à haute température).

La proposition de directive européenne ReFuelEU de juillet 2021 définit la courbe d'augmentation de la production de SAF au cours des années à venir et jusqu'en 2050. La proportion d'e-Bio-SAF et d'e-SAF dépendra de la part de la biomasse qui sera affectée à l'aviation.

Si 10 % de la biomasse disponible (soit 6 à 7 millions de tonne de biomasse sèche) était dévolu à la production de carburant pour l'aviation, le besoin en électricité représentera 50 TWh. Si seulement 3 millions de tonnes de biomasse sont allouées à l'aviation, alors le besoin d'électricité passera à 75 TWh.

La possibilité d'initier une filière SAF domestique dès 2030

Notre principale interrogation concerne la possibilité d'initier, dès 2030, une capacité industrielle pour une production à l'échelle de SAF.

Dans la prochaine décennie, avec une prolongation à 60 ans des réacteurs nucléaires et une augmentation importante des énergies renouvelables (jusqu'à une centaine de GW), la France pourrait disposer d'un volant d'une centaine de TWh décarbonés, disponibles pour lancer les filières industrielles de production de molécules énergétiques comme les SAF.

Ainsi, avec une vingtaine de TWh, il serait possible de produire en France les 2 millions de tonne de SAF requises pour 2035, là où la majorité des pays européens devront, pour cela, attendre 2040 et/ou recourir aux importations.

Si le secteur aérien ne se mobilise pas pour préparer dès maintenant le lancement de cette production, il ne sera pas bien armé pour participer à la définition du cahier des charges du mix énergétique de demain, qui conditionnera le déploiement de ces technologies.

Si l'on veut décarboner non seulement le secteur aérien mais l'ensemble de l'économie, il faudra en effet envisager, dès la période 2040-2050, de doubler la puissance installée électrogène, ce qui nécessite de relancer dès aujourd'hui la construction de nouveaux réacteurs nucléaires.

Le déploiement des sites industriels

Lancer un premier palier d'industrialisation massive dès 2030-2035 implique également des décisions urgentes.

Un site industriel capable de produire 0,6 Mt d'e-SAF, et de manière concomitante 0.4 Mt de e-diesel, occupera une surface d'1 km² et représente un investissement de 4 à 5 milliards d'euros, hors équipements électrogènes. Le coût des électrolyseurs, d'une puissance de 3 GW, représentera la moitié de l'investissement. À ceci s'ajoute un budget de fonctionnement de 1 milliard d'euros annuel en électricité. Avec les 22,2 TWh mobilisés par cette installation, on produit alors 12,2 TWh sous forme d'e-SAF. En optimisant l'intégration industrielle, et avec une électricité à 50 €/MWh, le coût de production des e-SAF pourrait être, à maturité, légèrement supérieur à 2 € le litre.

L'électrolyse à haute température (l'électrolyse représente 85 % du coût énergétique total) et la technologie de capture du CO₂ dans l'air (moins de 10% du coût énergétique total) sont critiques pour ce résultat.

Les coûts d'abattement

Les coûts de production associés, à maturité technologique, pourraient être proches de 2 500 € la tonne de kérosène synthétique, soit un coût d'abattement carbone de l'ordre de 325 € la tonne de CO₂, sous réserve de disposer d'un mix électrique à 20 grammes de CO₂ par kWh.

Selon la commission Quinet, la valeur carbone dépassera 300 € par tonne de CO₂ dans la prochaine décennie, ce qui légitime la production massive de SAF à cet horizon. Sachant qu'il faudra plus de dix ans pour structurer la filière, il est nécessaire d'anticiper rapidement les investissements associés.

L'option e-SAF est pertinente si les conditions sont remplies

Pour atteindre ces résultats, de nombreuses conditions doivent être remplies : accélérer les investissements technologiques et industriels dans les DAC, l'électrolyse HT et l'intégration système des installations e-bio-SAF et e-SAF ; sécuriser la trajectoire du parc électrique (maintien des centrales nucléaires existantes et autorisées par l'autorité de sûreté, création de nouveaux générateurs nucléaires et renouvelables) ; développer et stabiliser dans la durée une politique d'allocation des ressources (biomasse et électricité) afin de sécuriser les investissements et orienter le marché ; enfin, soutenir par une politique industrielle l'émergence rapide d'un secteur des carburants durables compte tenu de son intérêt stratégique (impact positif sur la décarbonation du secteur aérien, sur le développement de l'économie de l'hydrogène, sur l'indépendance énergétique, sur la réindustrialisation, sur l'économie des territoires, et sur la valorisation des surcapacités temporaires de production électrique).



Les impacts hors CO₂ de l'aviation sur le changement climatique

L'impact de l'aviation sur le changement climatique ne se limite pas aux émissions de gaz à effets de serre. Il comprend aussi les émissions d'oxydes d'azote et les traînées de condensation, dont l'effet est comparable à celui des émissions de GES.

Nicolas Jeuland : Vous avez raison, mais nous en avons une connaissance scientifique encore trop limitée pour agir à bon escient. Nous savons fabriquer des moteurs à très faibles émissions de particules, ou des moteurs très silencieux, ou qui consomment très peu, mais nous ne savons pas réunir toutes ces qualités dans un même moteur. Nous devons encore progresser pour savoir sur quel domaine faire porter prioritairement nos efforts.

Vous ne pouvez cependant pas aborder la question des carburants sans vous préoccuper des autres paramètres.

Nicolas Jeuland : Nous devons effectivement nous assurer que les solutions qui paraissent bonnes en termes d'émissions de CO₂ n'entraînent pas d'effets collatéraux indésirables. C'est ce que nous cherchons à vérifier à propos de l'hydrogène, notamment, car sa combustion n'émet aucune particule mais rejette trois fois plus d'eau que le kérosène, ce qui pourrait produire davantage de traînées de condensation.

L'un des grands intérêts des SAF est que, pour la première fois, nous pouvons écrire une sorte de « Lettre au père Noël » en termes de composition, en tenant compte d'une très grande diversité de critères.

L'impact du surcoût sur le trafic aérien

Le kérosène représente environ le tiers du prix des billets d'avion, et les carburants durables vont être beaucoup plus onéreux. Ceci ne devrait-il pas provoquer une forte réduction du trafic aérien ?

Nicolas Jeuland : L'augmentation du prix des billets n'entraîne pas toujours une diminution significative du trafic. Cela dit, avec le passage aux SAF, on ne parle pas d'une augmentation de 5 à 10 %, mais plutôt d'une multiplication par deux, trois, voire quatre, du prix des carburants. Cette augmentation va effectivement avoir un impact sur le trafic aérien. Il nous paraît cependant préférable que la réduction du trafic soit liée à l'utilisation des SAF qu'à des taxations massives.

La voie méthanol

Il existe d'autres voies que celles que vous avez évoquées, notamment le procédé MTG (méthanol to gasoline) développé par Exxon Mobil. Pourquoi n'en avez-vous pas parlé ?

Jean-Christophe Viguié : Je me suis concentré sur les technologies développées par l'IFPEN et commercialisées par Axens mais, effectivement, d'autres voies existent.

Echanges entre participants :

Après avoir beaucoup misé sur l'ammoniac pour le transport maritime, des acteurs comme CMA CGM ou Merck s'orientent vers le méthanol, filière qui a l'avantage d'être complètement mature. Cela fait quarante ans qu'Ariane est alimentée par une voie méthanol, par exemple.

Les deux voies, éthanol et méthanol, semblent comparables en termes de rendement et méritent toutes deux d'être développées.

Les mêmes carburants partout dans le monde ?

Le moindre petit aéroport d'Afrique dispose de kérosène, mais la fabrication de certains des carburants de substitution nécessite un niveau de maturité industrielle qu'on ne trouve pas dans tous les pays du monde.

Nicolas Jeuland : Des militaires m'ont expliqué que les deux seuls produits que l'on peut se procurer en qualité constante partout dans le monde sont le coca-cola et le kérosène...

Toute la beauté et la complexité des technologies dont nous parlons est que, à partir de ressources très différentes (huile usagée, biomasse lignocellulosique, électricité bas carbone...), on peut fabriquer exactement le même produit. Un avion qui partira d'Europe avec du carburant issu de biomasse cellulosique pour se rendre aux Émirats pourra en repartir avec du e-SAF puis, aux États-Unis, utiliser un carburant fabriqué à partir de

mais. L'important est de s'assurer que ces différents produits respecteront des normes garantissant la sécurité des vols.

L'intégration des procédés

Une des clés du succès sera la capacité à intégrer les procédés entre eux. Les coélectrolyseurs, notamment, permettent d'atteindre des rendements de 80 %, ce qui fait rêver...

Jean-Christophe Viguié : Je rêve, moi aussi, mais il existe souvent un écart entre ce qu'on peut imaginer sur le papier et la réalité industrielle. Il peut arriver que deux investissements soient portés par des entités juridiques différentes et réalisés sur des sites distincts, en sorte que le procédé global ne pourra pas être complètement optimisé.

J'ai été séduit par le concept de « hubs multiproduits ». Les produits complémentaires résultant de la fabrication des SAF pourront-ils apporter une contribution importante à l'équilibre d'un business-plan ?

Jean-Christophe Viguié : Même si le profit qu'ils représentent n'est pas forcément très élevé, ils peuvent apporter le petit « plus » qui permettra de passer au-dessus du seuil de rentabilité exigé par les investisseurs...

La concurrence entre usages de la biomasse

Même si la part de la biomasse utilisée pour le transport automobile est réaffectée à l'aérien grâce à la généralisation des véhicules électriques, les bioSAF seront en concurrence avec de nombreux autres usages de la biomasse : bois de chauffage, nourriture, fibres pour le textile, stockage du CO₂, etc.

Jean-Christophe Viguié : Pour le moment, en tout cas, l'utilisation de la biomasse n'est pas très développée, comme le montre une étude réalisée par l'Imperial College de Londres en 2021. Alliance Forêts Bois, premier groupe coopératif forestier de France, a perdu 500 000 tonnes d'utilisation industrielle de sa production au cours des cinq dernières années et il est à la recherche de projets d'utilisation de biomasse.

Comment pourra-t-on concilier une utilisation de plus en plus massive de la biomasse avec des objectifs, tout aussi importants, de préservation de la biodiversité ?

Jean-Christophe Viguié : Tout l'intérêt des biocarburants avancés est de recourir à des résidus, ce qui limite l'impact sur la biodiversité. Nous avons la chance, en

France, de disposer d'instituts d'agronomie qui pourront accompagner les acteurs industriels dans ce domaine afin de bien prendre en compte la biodiversité.

Industrialiser ou importer ?

La France et l'Europe ont décidé de décarboner leurs économies par une électrification massive, mais vont-elles réussir à produire suffisamment d'électricité sur leurs propres territoires pour atteindre cet objectif ? Ne faudrait-il pas envisager d'importer massivement de l'énergie, soit sous la

forme d'hydrogène, soit même sous la forme de SAF, depuis des régions du monde plus favorables à la production d'électricité et non adossées à des bassins de consommation susceptibles d'absorber cette production ?

Daniel Iracane : Je ne milite pas pour une solution nationale exclusive. Si nous ne réussissons pas à atteindre une puissance de 1 000 TWh sur notre territoire, nous devons recourir à l'importation, ce qui soulèvera d'autres questions. En revanche, ne rien faire en France serait contradictoire avec l'objectif stratégique de réindustrialisation de notre pays.

Mots clés : aviation, biocarburants, biomasse, décarbonation, hydrogène, SAF

Citation : Patrick Ledermann, Daniel Iracane, Xavier Bouis, Nicolas Jeuland & Jean-Christophe Viguié. (2023). *Des carburants durables pour l'aviation*. Les séances thématiques de l'Académie des technologies. @

Retrouvez les autres parutions des séances thématiques de l'Académie des technologies sur notre site

Académie des technologies. Le Ponant, 19 rue Leblanc, 75015 Paris. 01 53 85 44 44. academie-technologies.fr

Production du comité des travaux. Directeur de la publication : Denis Ranque. Rédacteur en chef de la série : Hélène Louvel. Auteur : Élisabeth Bourguinat. N°ISSN : 2826-6196.

Les propos retranscrits ici ne constituent pas une position de l'Académie des technologies et ils ne relèvent pas, à sa connaissance, de liens d'intérêts. Chaque intervenant a validé la transcription de sa contribution, les autres participants (questions posées) ne sont pas cités nominativement pour favoriser la liberté des échanges.