



Avis de l'AAE sur

# Vers un transport aérien décarboné



# Avis

# Les

ISBN 978-2-913331-99-0

ISSN 2426-3931

2024

AAE Avis n° 20

10€

# VERS UN TRANSPORT AÉRIEN DÉCARBONÉ

**Avis n° 20**

Février 2024



© Académie de l'air et de l'espace, février 2024. Tous droits réservés.  
Dépôt légal mars 2024

ACADÉMIE DE L'AIR ET DE L'ESPACE

Ancien observatoire de Jolimont

1 avenue Camille Flammarion

31500 Toulouse – France

[contact@academieairespace.com](mailto:contact@academieairespace.com)

Tél : +33 (0)5 32 66 97 96

[www.academieairespace.com](http://www.academieairespace.com)

Imprimé par :

Equinox

Parc d'Activités Industrielles de Gabor

81370 Saint-Sulpice – France

ISBN 978-2-913331-99-0

ISSN 2426 3931

Crédits images couverture © Photomontage AAE (Arrière-plan : IA généré Firefly/Adobe  
Photoshop – Avion : IA généré /Haval/Adobe stock)

# TABLE DES MATIÈRES

Avant-propos.....	5
Synthèse.....	9
<b>1- Spécificités internationales et économiques du transport aérien.....</b>	<b>15</b>
1.1 Environnement.....	16
1.2 Politique de transport aérien.....	17
1.3 Nécessité d'analyses prospectives approfondies.....	17
<b>2- Les quatre leviers de la décarbonation.....</b>	<b>19</b>
2.1 Efficacité énergétique du transport aérien.....	19
2.1.1 Accélération du renouvellement des flottes.....	19
2.1.2 Lancement de la génération suivante (entrée en service 2035 ?).....	20
2.1.3 Solutions "en rupture".....	21
2.1.4 Voler "autrement" ?.....	21
2.1.5 Quid des avions à propulsion par hydrogène ?.....	22
2.2 Les carburants durables.....	23
2.2.1 Les bio-carburants (bio-SAF).....	24
2.2.2 Les e-biocarburants (e-bioSAF).....	25
2.2.3 Les e-fuels (e-SAF).....	26
2.2.4 L'hydrogène comme intrant.....	26
2.3 Les émissions "négatives" par captage et séquestration du CO <sub>2</sub> .....	26
2.4 La sobriété.....	27
<b>3- La question de l'énergie.....</b>	<b>31</b>
3.1 Les besoins de l'aéronautique.....	31
3.1.1 Quels besoins en carburants aéronautiques et en électricité décarbonée ?.....	31
3.1.2 Comment produire les quantités de SAF requises en 2050 ?.....	31
3.1.3 Quels coûts, quels investissements ?.....	33
3.1.4 Quel impact de ces coûts supplémentaires sur le trafic ?.....	33
3.2 La disponibilité d'énergie "verte" au-delà du transport aérien.....	34
3.2.1 Défis industriels.....	35
3.2.2 Défis financiers.....	35
3.2.3 Défis sociétaux.....	35
3.3 Que devrait faire le transport aérien pour assurer ses approvisionnements en SAF ?.....	37
<b>4- Les effets hors CO<sub>2</sub> du transport aérien.....</b>	<b>41</b>
4.1 Les traînées de condensation ("contrails").....	42
4.2 Autres effets sur l'environnement.....	45
<b>5- Conclusion.....</b>	<b>47</b>

# AVANT-PROPOS

Dix ans après son Dossier n° 38 “Comment volerons-nous en 2050” et suite au colloque de mars 2021 “Transport aérien en crise et défi climatique. Vers de nouveaux paradigmes” qui avait donné lieu à son Avis n° 13, l’Académie de l’air et de l’espace (AAE) publie cet Avis n° 20 “Vers un transport aérien décarboné”, fruit de deux années de travail d’une commission Énergie et environnement (C2E) de plus de 60 membres, dont 20 extérieurs à l’Académie, originaires de huit pays européens, collectivement au meilleur niveau scientifique et technique dans les domaines du climat, de l’énergie et de l’aéronautique.

Cet avis braque le projecteur sur ce que devraient être les composantes essentielles de la stratégie de décarbonation du transport aérien. Pourquoi une nouvelle publication, alors que l’Académie s’est exprimée plusieurs fois sur le sujet et que celui-ci fait l’objet par ailleurs de nombreuses publica-

tions d’origines diverses ? La raison principale tient à l’évolution extrêmement rapide du contexte général de la décarbonation du secteur. L’ampleur des défis à surmonter est de plus en plus visible, et elle amène des questions nouvelles. Ces défis concernent trois domaines :

## Technologie

L’innovation technologique sera une condition clé de la réussite : d’abord en tirant pleinement parti de ce qui existe (modernisation des flottes) et en améliorant les performances (aérodynamique, nouvelles configurations, masses réduites etc.) ; puis en développant l’utilisation de carburants à très faibles émissions (SAF, *Sustainable Aircraft Fuels*), dont les processus de fabrication sont connus aujourd’hui, mais réclameront beaucoup d’électricité décarbonée dans leur version synthétique, et seront plus chers que le kérosène au moins dans une première

période. D'autres types de propulsions sont envisageables (électrification, hybridation, hydrogène) mais pour des tailles d'avions limitées.

L'optimisation opérationnelle et technique des systèmes de navigation aérienne pourrait également permettre une diminution des émissions du transport aérien, jusqu'à 5 % en Europe.

Une fois toutes les solutions technologiques prises en compte, il y aura des émissions résiduelles qui pourront être compensées par captage et séquestration de CO<sub>2</sub>.

Dans tous ces domaines, il conviendra de mettre en œuvre **une stratégie générale d'accélération** : incitations à la modernisation des flottes et à l'utilisation de SAF, soutiens à la recherche, investissements dans la production de SAF et les techniques de séquestration de CO<sub>2</sub>.

## Énergie

Le principal apport de cet avis réside dans une analyse détaillée des besoins énergétiques résultant de l'utilisation de SAF, dans le cadre de la nouvelle réglementation européenne (ReFuelEU). En effet, avoir la solution technologique n'est pas suffisant, il faut pouvoir la mettre en œuvre, c'est-à-dire disposer d'une part suffisante d'électricité décarbonée. Nous estimons celle-ci au minimum à 11 % du total requis pour l'ensemble des besoins de l'Union européenne

(UE) (650TWh versus 6 000TWh). Quant aux investissements pour produire les SAF, y compris la production d'électricité, ils sont estimés annuellement au minimum à 40 Md€ pendant 25 ans.

Ces chiffres sont très élevés et appellent des réflexions sur la politique à suivre. On ne peut exclure un scénario de pénurie d'électricité décarbonée, et dans ce cas se posera la question de l'allocation de la ressource aux différents secteurs d'activité. Les compagnies aériennes pourraient être amenées à accroître leurs approvisionnements à l'étranger, ce qu'elles semblent déjà anticiper aujourd'hui. La stratégie politique de décarbonation et le respect d'une indépendance énergétique européenne pourraient ainsi devenir difficiles à concilier.

Les autorités publiques vont donc devoir susciter les investissements massifs nécessaires ou/et se poser la question de la régulation. Les investisseurs auront besoin de **stabilité réglementaire** leur permettant d'avoir une visibilité accrue sur les marchés futurs. La régulation devrait **tenir compte des capacités technologiques respectives des différents secteurs économiques à se décarboner, et devrait donc servir prioritairement le transport aérien.**

## Sobriété et réglementation

Les incertitudes qui pèsent sur les politiques appellent des réflexions de fond sur les évo-

lutions sociétales relatives au voyage aérien dans son contexte international.

La crise du Covid a provoqué des changements d'attitudes, notamment au niveau des entreprises avec une diminution perceptible des voyages d'affaires. Toutefois, les voyages touristiques ont repris leur croissance, et l'IATA (Association du transport aérien international) prévoit une année 2024 record. L'Académie pense qu'il ne s'agit pas d'un phénomène uniquement conjoncturel et que les professionnels de l'aérien doivent dès maintenant réfléchir au voyage aérien de demain.

La tentation de vouloir contraindre réglementairement le trafic est présente dans un certain nombre d'esprits. Quels que soient les arguments, une telle politique appliquée unilatéralement au transport aérien international n'aurait selon nous aucune chance de prospérer, comme l'ont démontré plusieurs exemples passés. En revanche, les pays européens devraient mettre en œuvre des stratégies coopératives avec les pays tiers et s'allier pour soutenir des évolutions politiques au niveau de l'OACI (Organisation de l'aviation civile internationale).

L'idée d'accroître artificiellement les coûts par l'application de taxes, et donc ainsi d'exercer une pression à la baisse sur le trafic, est également quelquefois avancée. Outre le fait que son impact soit incertain, ce type de politique viendrait, selon nous, per-

cuter la politique de libéralisation européenne et mondiale, suivie depuis plus de 30 ans, qui visait à accroître l'accès au transport aérien des populations les moins aisées.

## **En conclusion**

Cet avis soulève beaucoup de questions politiques, met en évidence les certitudes, mais aussi les incertitudes relatives aux différentes actions possibles. Il tente de donner quelques repères et ouvre des débats qui ne pourront avancer qu'avec une analyse approfondie de différents scénarios prospectifs. L'Académie de l'air et de l'espace va poursuivre ses analyses thème par thème et se tient prête à contribuer à toute réflexion d'envergure. Sur les différents thèmes évoqués, et en parallèle, elle publie des approfondissements dans le Dossier n° 55 : "Le transport aérien décarboné en 2050 : une question d'énergie".

Michel WACHENHEIM  
*Président de l'Académie de l'air  
et de l'espace*

# SYNTHÈSE

Le transport aérien a joué un rôle important dans le désenclavement et le développement économique de nombreux pays et territoires. Il a permis un incroyable essor des relations entre les peuples du monde. Sa libéralisation et ses réductions de consommation et de coûts ont donné accès au voyage lointain à une grande part de la population des pays développés et cela va se poursuivre dans le reste du monde.

Dans les années qui viennent, le transport aérien européen veut être durable face au défi climatique et vise la neutralité carbone en 2050.

La décarbonation de l'aviation passe par : (a) la réduction très forte de la consommation des avions ; (b) l'usage de carburants alternatifs au kérosène<sup>1 2</sup> ; (c) le captage et la

séquestration de CO<sub>2</sub> pour rendre "neutres" les émissions dues à un reliquat de kérosène "fossile" ; (d) la sobriété.

- a) L'accélération du renouvellement des flottes aériennes (âge moyen 12 ans) par des avions récents et l'apparition vers 2035 d'une nouvelle génération d'avions vont fournir deux gains de consommation successifs par passager-kilomètre-transporté (pkt) de 30 % et 25 %. Étant donné que les vols moyen- et long-courriers de plus de 1500 km partant d'Europe génèrent plus de 70% des émissions de CO<sub>2</sub>, c'est sur eux qu'il faut agir en priorité.
- b) Différentes variantes de "SAF" compatibles avec les avions actuels sont en début de production industrielle et permettront une transition sûre grâce à leur

---

1 Ces carburants alternatifs sont dénommés Carburants d'aviation durable (CAD), en anglais Sustainable Aviation Fuels (SAF). Ils sont produits soit à partir de sources bio (bio-SAF), soit à partir de CO<sub>2</sub> et d'hydrogène... et de beaucoup d'électricité (e-SAF /e-fuel). Dans tout le document on utilisera le terme SAF plus répandu que CAD.

2 Pour l'aviation générale et les court-courriers de moins de 100 places, des alternatives "tout électrique" ou "hybride" ou encore "hydrogène" paraissent intéressantes. Voir plus loin dans le corps du texte.



capacité “drop-in”. Les SAF issus de sources bios présentent beaucoup d'avantages, mais la quantité disponible en Europe pour l'aviation va se trouver limitée à 20% des besoins<sup>3</sup>. *En conséquence, le recours à une quantité importante d'e-fuels nécessitant beaucoup d'électricité décarbonée est un point de passage obligé.*

- c) Des opérations mesurables et certifiables de captage et séquestration du CO<sub>2</sub>

produiront des effets “d'émissions négatives” neutralisant tonne pour tonne les émissions liées à l'utilisation de kérosène fossile qui subsistera.

- d) Différenciée suivant les pays, la sobriété dans les usages et les comportements fera son chemin dans les esprits comme elle commence à le faire pour les déplacements professionnels.

D'où les recommandations ci-dessous :

#### **Recommandation 1**

**Les pouvoirs publics devraient mettre en place des incitations permettant d'accélérer le renouvellement des flottes.**

#### **Recommandation 2**

**Les pouvoirs publics devraient soutenir prioritairement et dès maintenant le développement d'un transport aérien utilisant des SAF.**

#### **Recommandation 3**

**Le secteur aérien et les pouvoirs publics européens devraient susciter des investissements massifs dans la production de SAF, en affichant une stratégie réglementaire stable et ainsi une visibilité accrue sur la demande future.**

#### **Recommandation 4**

**Les pouvoirs publics européens et nationaux devraient effectuer les futurs arbitrages pour l'accès à la biomasse d'une part, aux importations de carburant “durable” d'autre part, à la hauteur de l'utilité sociale et économique de l'aviation.**

<sup>3</sup> Ces 20% sont confirmés par un rapport de l'Académie des technologies, juin 2023 : “La décarbonation du secteur aérien par la production de carburant durable” – <https://shorturl.at/xGIKW>

#### **Recommandation 5**

Les industriels et les pouvoirs publics devraient accélérer le déploiement du processus de captage et de séquestration du CO<sub>2</sub> qui s'avère nécessaire pour atteindre les objectifs de neutralité carbone en 2050.

#### **Recommandation 6**

Les mesures économiques et réglementaires prises dans un cadre national ou européen ne seront pleinement efficaces que si elles sont acceptées et appliquées par le reste du monde. Pour cela, elles devraient être négociées dans le cadre des accords internationaux existants (OACI et accords bilatéraux).

#### **Recommandation 7**

Le secteur du transport aérien européen devrait adapter ses perspectives dans un esprit de sobriété et de « meilleur usage », tout en valorisant le caractère irremplaçable du voyage.

### **Quelles sont les conditions de succès ?**

- **Renouvellement des flottes ?** Pas d'obstacle majeur, c'est dans l'intérêt bien compris des compagnies aériennes. La limite sera celle des cadences de production des avionneurs.
- **Développement d'avions nouveaux ?** Ici aussi la loi du marché et les gains de consommation seront des facteurs de motivation pour les avionneurs et les compagnies aériennes. Parmi ces développements, les concepts d'avions à propulsion à hydrogène liquide moyen-courriers et long-courriers suscitent le doute, tant ils devront surmonter de nombreux obstacles techniques, opérationnels et commerciaux, dont la mise en place dans le monde entier d'installations aéroportuaires dédiées.
- **Production des SAF ?** L'adoption par l'Union européenne (UE) du règlement ReFuelEU, exigeant une incorporation croissante de SAF en 2050, lève bien des incertitudes pour les investisseurs. Pas d'obstacle technique majeur, mais il faut que les investissements énergétiques, au-delà de l'aviation, passent à la vitesse supérieure afin d'éviter une possible pénurie d'énergie décarbonée pour l'ensemble de la société. Ceci représente un énorme enjeu industriel et économique. Les obstacles sociétaux devront être surmontés afin d'accélérer les implantations productrices d'électricité décarbonée.

- **Captage et séquestration du CO<sub>2</sub> ?** Des initiatives sont en cours pour des industries où le GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) reconnaît que ce procédé ne peut pas être évité. Le secteur aérien devrait s'impliquer davantage.
- **Acceptation d'une certaine sobriété ?** L'*aviation bashing* est injuste. En revanche, un débat ouvert reste possible : de meilleurs usages, raisonnés, devraient être progressivement définis par tous les acteurs.

### Remarque fondamentale

Le transport aérien européen n'est pas totalement maître de son destin. Il va en effet être tributaire de la fourniture de suffisamment d'énergie décarbonée, une part notable de l'électricité européenne. Or la transition énergétique est à peine entamée : pour l'ensemble de la société au niveau de l'UE, les besoins d'investissement dans la production d'énergie décarbonée se situeraient eux-mêmes à environ 6 500 milliards d'euros ; soit 250 milliards d'euros par an jusqu'en 2050. À 26 années de 2050 et vu les délais de mise en place d'un tel ensemble industriel, c'est un programme d'investissement sans égal depuis la reconstruction d'après-guerre qui est à démarrer.

### Explication

En 2050, les aéroports européens auront l'obligation de fournir un minimum de 70% de SAF soit ~ 28 millions de tonnes/an (ordre de grandeur).

Ce besoin fera appel à plus de 10% de l'électricité décarbonée européenne<sup>4</sup>, environ 650 TWh par an, quantité de l'ordre de la consommation électrique totale actuelle de pays comme l'Allemagne ou la France.

Cette énergie décarbonée risque déjà d'être insuffisante en 2050 pour les besoins du reste de la société<sup>5</sup>.

D'où une réflexion qui dépasse largement le secteur aérien : les plans nationaux et européens de "transition énergétique" nous semblent très optimistes sur la capacité de la société à réduire sa consommation d'énergie et à investir. Il serait dommage de manquer ici une opportunité de réindustrialiser nos territoires et ce faisant, d'économiser l'import de 100 Md€/an de carburant "durable".

<sup>4</sup> En effet, quand la route gagne 50% d'énergie en passant à l'électrique, le kérosène de synthèse double les besoins d'énergie électrique. La disponibilité de quantités suffisantes d'électricité décarbonée est donc déterminante.

<sup>5</sup> Les États-Unis avec leur Inflation Reduction Act (IRA) ont lancé une dynamique à la mesure de l'enjeu.

### Remarque

**Dans ces trois pages de synthèse, nous ne faisons pas de recommandations sur les traînées de condensation et les cirrus induits** si ce n'est de poursuivre les recherches en vue de mieux comprendre le phénomène et de proposer en temps opportun des mesures d'atténuation des effets. Nous rappelons que cet effet aussi difficile à mesurer qu'à modéliser n'est pas cumulatif et donc n'est pas directement ajoutable aux cumuls de CO<sub>2</sub> liés à la combustion. Le doublement des émissions souvent affiché aujourd'hui est un raccourci scientifiquement discutable. **Des explications sont fournies dans le corps du document** (voir § 4.1).

## Quelques ordres de grandeur du transport aérien<sup>6</sup>

### Trafic aérien mondial (en 2019)

- **46,8 millions de vols** effectués par 1 478 compagnies aériennes
- **8 680 milliards** de passagers-km transportés (pkt) et **57 millions** de tonnes de fret
- **115 accidents** dont **6 accidents mortels** ayant causé **239 victimes**

### Nombre d'avions à turboréacteurs

- **23 000 avions** en service consommant en moyenne **3,4 l/100 pkt**
- **6 500 avions** post 2017
- **15 000 avions** de type récent commandés (fermes + options) consommant **2,5 l/100 pkt**
- Cadences de production : **2 000 à 2 500 avions/an à partir de 2025**
- Apparition d'**avions de type nouveau en 2035** consommant **1,8 l/100 pkt**, soit presque deux fois moins que la consommation moyenne constatée en 2019

### Consommation kérosène en 2019<sup>7 8</sup>

- **290 Mt** (monde) dont 20% pour le fret – **50 Mt** (au départ de l'UE) fret inclus
- Seulement 30% des vols au départ d'Europe dépassent 1 500 km, mais ceux-ci émettent 75% du CO<sub>2</sub> imputable au trafic aérien européen

6 ICAO "Presentation of 2019 Air Transport Statistical Results" – <https://shorturl.at/hosU7>

7 EASA EEA Eurocontrol Rapport "Environnement de l'aviation européenne 2022" – <https://shorturl.at/bfqIU>

8 FNAM "Feuille de route de décarbonation de l'aérien", mars 2023 – <https://shorturl.at/mtPZ5>

## Quelques ordres de grandeur du transport aérien (suite)

### Émissions CO<sub>2</sub>

- **915Mt** (monde) – **156Mt** (au départ de l'UE)

### Consommations annuelles en 2050 au départ de l'UE

- “Cas de base” fondé sur une augmentation modérée du trafic depuis l'Europe et des réductions de consommation unitaire
- **40 Mt** de carburant, dont **28 Mt de SAF (8 Mt bio-SAF + 20 Mt e-SAF) + 12 Mt** de kérosène (à rendre neutres par captage/séquestration)

### Énergie électrique pour produire les SAF utilisés par le transport aérien en UE

- Énergie électrique pour produire 1 kg d'e-SAF : ~25 kWh
- Énergie électrique pour produire 1 kg e-bio SAF : ~10 kWh
- Énergie électrique pour mix aviation européenne 2050 : ~**650 TWh/an** (incluant 10% pour tenir compte de l'intermittence de la production des renouvelables), **s'ajoutant aux autres investissements en électricité décarbonée de l'UE donc entre ~11 % et ~12 % sur un total de ~6000 TWh/an** (voir l'encart page 34)

### Investissements pour le transport aérien

- Production de SAF (UE) y compris l'énergie nécessaire : ~**1 000 Md€** c'est-à-dire **40 Md€/an** jusqu'en 2050

### Estimation du coût des carburants en 2050

- Coût de production de 28 Mt de SAF : ~**70 Md€/an**
- Coût d'élimination du CO<sub>2</sub> pour 12 Mt de kérosène : ~10 Md€<sup>9</sup>
- Coût des SAF en 2050 : environ **2€/l** (aujourd'hui **0.8 €/l**) avec une électricité à 50€/MWh

<sup>9</sup> Ne pas confondre d'une part CCU (carbon capture and utilization) et d'autre part CCS (carbon capture and storage), DACS (direct air capture and storage) et CDR (carbon dioxyde removal). Le CO<sub>2</sub> capté en sortie d'usine et réutilisé (CCU) n'est pas une véritable “émission négative”. Les autres le sont !

# 1- SPÉCIFICITÉS INTERNATIONALES ET ÉCONOMIQUES DU TRANSPORT AÉRIEN

La raison d'être du transport aérien est d'aller vite et loin, c'est donc par nature un mode de transport essentiellement international. Ses caractéristiques font qu'il n'existe que s'il garantit à ses clients un très haut niveau de sécurité. Il est facile de comprendre que pour qu'il en soit ainsi, une normalisation technique et une interopérabilité très poussée sont nécessaires. La satisfaction de ces exigences repose sur des accords entre États qui restent souverains sur leurs espaces aériens et libres d'établir leurs réglementations nationales.

Ces exigences ont parfaitement été identifiées avant même la fin de la Seconde Guerre mondiale alors que le développement futur du transport aérien civil était anticipé par les Américains et les Européens. Une Convention internationale signée à Chicago le 7 décembre 1944, a :

- définit le fonctionnement d'un dispositif de normalisation internationale unique en son

genre car évolutif et juridiquement opposable aux États membres ;

- adopté une base de règles par lesquelles les États acceptent l'utilisation de leur espace aérien par des aéronefs d'autres États membres et l'exploitation d'un trafic commercial à destination ou en provenance de ces États, dans certaines conditions ;
- créé l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI) chargée de gérer et de faire évoluer ce corpus réglementaire et de proposer l'évolution des politiques concernées aux États membres.

L'OACI est donc une organisation d'États et non une agence supranationale. Les 193 États membres de l'OACI, en signant souverainement la Convention de Chicago, acceptent ses règles et s'engagent à les respecter.

## 1.1 Environnement

En matière environnementale, l'OACI a une politique de limitation des nuisances sonores depuis plus de 50 ans, réglemente les émissions locales depuis les années 1980, et développe une politique relative aux émissions de CO<sub>2</sub> depuis 20 ans, conformément au mandat qu'elle a reçu du Protocole de Kyoto (1997), non remis en cause par les différentes COP de la Convention-cadre des Nations-unies sur les changements climatiques, y compris par l'Accord de Paris.

La stratégie suivie repose sur quatre piliers :

- l'innovation technologique stimulée par un système de normes d'émissions CO<sub>2</sub> et de certification adopté en 2016 ;
- l'amélioration des opérations aériennes et des infrastructures ;
- le développement des carburants durables (SAF) ;
- les mesures de régulation économiques dites "basées sur le marché", qui se sont traduites par l'adoption du système CORSIA, mis en œuvre récemment.

Ainsi, non seulement le transport aérien est l'objet de politiques de limitations des émissions entérinées internationalement, **mais c'est le seul secteur économique organisé de la sorte au niveau mondial.**

**Il est évident que dans ce contexte, des mesures unilatérales incompatibles avec**

**nos engagements internationaux ne peuvent être prises sans concertation et accord avec les pays tiers.** Plusieurs précédents ont amené l'Europe à renoncer à des projets non acceptés par la majorité des États. C'est donc en amont qu'il faut œuvrer diplomatiquement pour convaincre nos partenaires du bien-fondé de nos projets et nouer des alliances, faute de quoi les mêmes causes produiront les mêmes effets.

Notons aussi que les émissions du transport domestique sont, quant à elles, parfaitement couvertes par l'Accord de Paris, et que les émissions intra-communautaires peuvent être traitées par les 27 membres de l'UE. Ainsi deux projets de réglementations européennes en cours visent à contribuer à l'objectif mondial d'émissions nettes nulles en 2050, adopté par la dernière assemblée de l'OACI (voir chapitre 2) :

- dès 2026, soumission complète de l'aviation intra-européenne au marché du carbone (ETS). Cette mesure assure que les quotas d'émissions fixés par l'UE sont respectés par l'ensemble des secteurs couverts, aviation incluse ;
- progressivement, de 2025 à 2050 par des minima obligatoires de carburant bas carbone dans la composition des carburants aéronautiques (ReFuelEU). Un taux minimum de 70 % de SAF en 2050 (dont 35 % minimum de carburants synthétiques) sera exigé.

## 1.2 Politique de transport aérien

Autrefois, le transport aérien était entièrement régulé par les États, dans le cadre d'accords diplomatiques bilatéraux. Les grandes compagnies internationales régnaient sur le marché. En Europe, elles étaient majoritairement publiques. Puis, depuis 30 ans, bien que le système reste toujours régi par des accords diplomatiques, la libéralisation a changé la donne. Les réseaux ont été réorganisés autour de grandes plates-formes de correspondance (*hubs*) avec des horaires coordonnés entre lignes d'apport et long-courriers, de façon à optimiser les transits et à densifier des liaisons long-courriers. Ce système, qui existe toujours, a eu pour effet de faire baisser les coûts (économies d'échelle) et d'augmenter l'offre de destinations possibles. Les compagnies européennes ont été privatisées et sont apparues des compagnies dites "à bas coûts" qui ont dynamisé de nouveaux segments de marché. Le nombre de liaisons desservies a considérablement augmenté. De nos jours, le marché du transport aérien intra-européen se comporte comme un marché intérieur (domestique).

Le transport aérien est devenu ainsi accessible à des couches de population moins favorisées, y compris dans les pays en développement où le processus se poursuit. C'est un facteur de développement pour un grand

nombre de pays, y compris les plus pauvres, dans certains cas grâce au tourisme de masse. Il paraît difficile de revenir sur cette évolution sans soulever une problématique sociale.

C'est pourquoi nous estimons que des politiques de régulation par les coûts (y compris les taxes) n'auraient pour effet que de régresser vers le modèle antérieur, d'autant que la clientèle aisée serait très peu sensible à ces augmentations. La solution la plus efficace pour sortir du dilemme consiste à agir d'abord pour réduire les émissions, mais sans entraver le développement là où il est utile. L'objectif de diminution des émissions n'entraîne pas automatiquement le freinage de la croissance du trafic.

## 1.3 Nécessité d'analyses prospectives approfondies

Qui peut prétendre que des ruptures aussi importantes n'auront pas lieu dans les trente ans ? La question qu'il faudrait avoir le courage de poser est : « *faut-il remettre en cause cette politique ?* ». Cette question ne concerne pas seulement le transport aérien d'ailleurs. Ce sont les principes de la politique de libéralisation des échanges internationaux qui pourraient être remis en cause. Mais personne ne veut la poser évidemment.

L'estimation du trafic aérien à long terme est un élément notable pour le calcul de l'évolu-



tion des émissions de CO<sub>2</sub>. Les modèles économétriques classiques ne rendent pas bien compte de l'impact des ruptures de toutes natures et des évolutions structurelles. Seules les méthodes de la prospective stratégique sont adaptées à la construction de scénarios à très long terme.

**L'Académie de l'air et de l'espace estime qu'une telle étude serait nécessaire afin de donner un sens aux "prédictions" diverses et d'éclairer les choix stratégiques à faire**

**maintenant pour atteindre les objectifs de 2050. Un tel projet demande des moyens significatifs, mais avant tout un savoir-faire qu'il conviendrait de bien identifier. L'Académie pourrait y contribuer en mettant à disposition l'expertise de ses membres, en tant que de besoin. Évidemment la contribution de nombreux autres acteurs serait requise.**

### Avis

- Le cadre juridique et technique de la Convention de Chicago impose de prendre en compte l'impact international des stratégies locales de décarbonation, européennes ou nationales, et de sécuriser diplomatiquement leur mise en œuvre.
- La mise en œuvre de politiques de régulation par les coûts (taxes comprises) ou par l'offre, outre le fait de ralentir les capacités d'investissement des transporteurs et donc la modernisation de leurs flottes, viendrait de façon évidente percuter la politique de libéralisation européenne et mondiale, suivie depuis plus de 30 ans.
- La période de ruptures de toutes natures que nous traversons devrait inciter à la réalisation d'analyses prospectives stratégiques très approfondies permettant de fonder les décisions politiques sur des scénarios intégrant les évolutions structurelles et sociétales.

## 2- LES QUATRE LEVIERS DE LA DÉCARBONATION

**Dans les années qui viennent, le transport aérien entend bien “devenir durable” face au défi climatique et donc vise la neutralité carbone en 2050.**

Les “leviers” permettant cette décarbonation seront :

- a) l'efficacité énergétique du transport aérien ;
- b) les carburants durables ;
- c) le captage et la séquestration du CO<sub>2</sub> ;
- d) la sobriété.

### 2.1 Efficacité énergétique du transport aérien

#### 2.1.1 Accélération du renouvellement des flottes

Les avions récents (générations post 2017) consomment nettement moins de carburant

par kilomètres passagers que la moyenne des avions en service (2 à 2,5 litres/100 km contre 3 à 3,5 l/100 km, soit -30%). Le gain est tel qu'il semble être de l'intérêt même des compagnies d'anticiper les remplacements.

Sur les 23 000 avions utilisés quotidiennement, environ 6 500 avions sont récents<sup>10</sup> (post 2017) et donc 17 000 sont candidats au remplacement. À ces avions s'ajouteront ceux achetés par les compagnies des pays émergents (Inde, Sud-Est asiatique et aussi en Afrique) qui développent leurs flottes. À ce jour près de 15 000 commandes fermes + options ont été enregistrées. De fait, le renouvellement des flottes sera limité par les capacités de production des principaux avionneurs même si ceux-ci prévoient de fabriquer autour de 2 000 à 2 500 avions par an à partir de 2025 (plus potentiellement

---

<sup>10</sup> A320neo, A350, A330neo, B787 et B737max.

environ 300 à 400 avions par an en Chine<sup>11</sup>). Il faudra donc une douzaine d'années pour que ce gain se matérialise complètement.

### 2.1.2 Lancement de la génération suivante (entrée en service 2035 ?)

On attend un gain de consommation (Jet fuel ou équivalent SAF) de 25 à 30% par rapport à la génération 2017 (A320neo, A350).

Les gains de consommation identifiés portent :

- a) sur l'aérodynamique avec des ailes à très grand allongement ou haubanées requérant une innovation dans les structures ;
- b) sur les moteurs dont le taux de dilution va faire un bond avec des concepts de rotors ouverts (open rotor RISE de CFM) ou d'immenses soufflantes à pas variable (Ultrafan de Rolls-Royce) qui obligent à

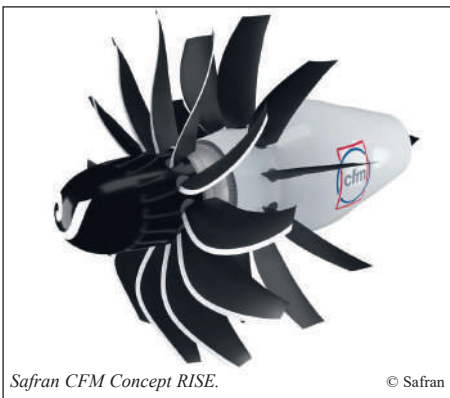
repenser la géométrie d'ensemble de l'avion ;

- c) des gains de masse de multiples origines (fabrication additive etc.).

Ceci concerne des avions à motorisation "classique" alimentés avec des SAF "carburants d'aviation durables" (neutres en émission CO<sub>2</sub>).

Une bonne douzaine d'années est nécessaire pour mettre au point une formule comportant autant d'innovations : dans l'attente, ce délai doit favoriser le renouvellement des flottes qui sera acquis au rythme évoqué plus haut.

Au total, à terme c'est donc une diminution de consommation **de plus de 40 %** qui s'annonce. Il faudra cependant attendre une dizaine d'années après 2050 pour que toute la flotte mondiale ait quitté la (déjà excellente) génération 2017 !



<sup>11</sup> C919 de la COMAC et ses successeurs.



Éssai de chargement et de déchargement des modules sur l'aéroport de Toulouse-Blagnac. © Universal Hydrogen

### 2.1.3 Solutions “en rupture”

En parallèle se développent des innovations pour les court-courriers, de capacité modeste (avions légers de quelques places, *commuters* de moins de 20 places et avions régionaux de 50 places), faisant appel à l'électricité sur batteries et/ou à l'hybridation par moteur thermique (SAF ou hydrogène) ou pile à combustible, silencieux, économes en énergie comme en CO<sub>2</sub> des infrastructures<sup>12</sup>, concurrents nouveaux et directs de transports terrestres même dans les pays développés. Certains projets prévoient de rétrofiter des avions régionaux avec une propulsion à l'hydrogène gazeux ou liquide, l'avitaillement étant fait par un système de cartouches interchangeables.

Les faibles coûts d'investissement et d'exploitation de ces appareils “décarbonés” pourraient conduire à des transferts modaux inverses de ceux que certains prônent aujourd'hui !



Pipistrel Velis Electro, premier avion entièrement électrique certifié de ce type au monde. © Pipistrel

Ces avions feront baisser notablement les émissions des vols très courts mais ceux-ci n'émettent qu'une très faible partie du CO<sub>2</sub> de l'aviation (moins de 5 %).

### 2.1.4 Voler “autrement” ?

Pour réduire la consommation du transport aérien, deux changements de conditions du voyage aérien ont été suggérées : réduire la vitesse et réduire la longueur des étapes qui conduirait à segmenter les vols long-courriers et prévoir une ou deux escales.

Réduire la vitesse de croisière ne peut conduire à une réduction de la consommation d'énergie significative que si on l'associe à un changement de système de propulsion : remplacement des turbo-fans par des hélices. Une durée des vols long-courriers significativement allongée pourrait être ressentie négativement par les passagers.

<sup>12</sup> Short-haul flying and sustainable connectivity – Prepared for ERA, ACI EUROPE, ASD Europe, CANSO, and A4E, 24 March 2022 – <http://www.oxera.com>

Ajouter deux escales<sup>13</sup> à un vol de 15000 km permettrait une **réduction jusqu'à un quart** de la consommation de carburant. Avec comme conséquence une augmentation du nombre d'avions, et une charge supplémentaire des aéroports.

Les compagnies aériennes pourraient proposer des vols avec escales avec un "intéressement" au gain de CO<sub>2</sub> à court terme, au gain économique plus tard...

### 2.1.5 Quid des avions à propulsion par hydrogène ?

Un avion à hydrogène est, à mission égale, plus gros et surtout plus lourd qu'un avion classique. Il est d'autant plus pénalisé en consommation qu'il a de distance à franchir, conséquence mineure sur des avions court-courriers, déjà importante pour des moyen-courriers, mais qui devient rédhibitoire pour des avions long-courriers.

Si l'utilisation de l'hydrogène dans les systèmes propulsifs n'apparaît pas trop difficile, la conservation de l'hydrogène liquide dans les réservoirs<sup>14</sup> et son transfert au moteur posent des difficultés encore loin d'être résolues. Des industriels majeurs pourraient se prononcer sur la faisabilité et la pertinence économique d'avions à hydrogène d'ici trois à quatre ans.

Face aux difficultés à résoudre pour obtenir une fiabilité satisfaisante se pose le problème de la crédibilité de certains projets poussés par des *start-ups* ne disposant pas des équipes aguerries pour conduire la définition et la certification.

Produire, transporter, stocker et avitailler en hydrogène liquide les aéroports pose des défis de grande ampleur. **La capacité à ravitailler les avions en hydrogène liquide dans un grand nombre d'aéroports sera un élément-clé de décision, notamment en raison des gros investissements nécessaires et des orientations stratégiques que prendront les différents acteurs.**

Des développements technologiques et des essais au sol et en vol peuvent apporter des réponses aux nombreux points à étudier et être utiles pour préciser le potentiel à long terme du carburant hydrogène liquide. **Il est cependant essentiel qu'ils ne détournent pas l'attention, ni les financements, de solutions de décarbonation plus solides et plus rapides à mettre en œuvre, notamment en ce qui concerne la diminution des consommations et la disponibilité des SAF.**

<sup>13</sup> Encore faut-il que le trajet s'y prête !

<sup>14</sup> Les réservoirs cryogéniques doivent être à la fois grands en volume, isolés thermiquement et d'une masse non pénalisante.

Une fois ces difficultés surmontées, les SAF alors largement disponibles auront pris leur place sur le marché, et l'éventuelle **“mixité de flottes” entre avions à hydrogène et avions utilisant des carburants durables (drop-in SAF) conduirait à limiter l'interopérabilité, compliquer les opérations des compagnies aériennes, et nécessiter une duplication des investissements.**

La contribution de l'hydrogène liquide à la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> restera donc modeste en 2050, par rapport aux

améliorations techniques et opérationnelles et à l'emploi des *Sustainable Aviation Fuels* (SAF) : bio-fuels et e-fuels, qui sont compatibles “drop in”.

Tant que les travaux en cours n'auront pas abouti, la perspective de l'hydrogène liquide comme combustible des moteurs d'avions apparaîtra donc très faible à l'horizon 2050 et incertaine au-delà. Cependant, les succès “improbables” de la R&T obtenus depuis des dizaines d'années rendent prudents avant de dire “jamais”.

Considérant que les financements de la R&D ne sont pas illimités, il paraît prioritaire d'investir dans le développement d'avions nouveaux utilisant des SAF et pour la disponibilité de ces SAF, plutôt que dans le développement d'avions à hydrogène et de leurs infrastructures aéroportuaires.

## 2.2 Les carburants durables

L'Union européenne a adopté le règlement “ReFuelEU Aviation” qui impose une proportion croissante de Carburants d'aviation durable (CAD/SAF), neutres en cycle CO<sub>2</sub>, en substitution au kérosène (2% en 2025, 20% en 2030, 70% en 2050).

On remarquera que même si l'obligation du recours aux SAF s'arrête pour le moment à 70% en Europe, la plupart des compagnies aériennes s'efforceront probablement d'atteindre les 100% chaque fois que le carburant sera disponible. S'il ne l'est pas, il leur

restera la possibilité de compenser très exactement leurs émissions de CO<sub>2</sub> (dues à l'emploi de kérosène fossile) par une captation certifiée de CO<sub>2</sub> atmosphérique, sujet évoqué plus loin.

### Quels sont ces SAF ?

1. Les bio-carburants actuels<sup>15</sup> miscibles avec le jet fuel réduisent, employés purs, les émissions de plus de 90%. Leur utilisation dans des proportions croissantes est programmée. Des usines commencent à les produire, d'autres sont en construction. La ressource est limitée.

<sup>15</sup> Dont ceux résultant de l'emploi des huiles usagées.

2. Les e-biocarburants utilisent tout le carbone de la plante avec un apport d'hydrogène "vert" et de ce fait mobilisent deux fois moins de surface de bio-cultures. Les procédés existent, le passage du pilote en laboratoire à l'industrialisation massive doit faire l'objet d'efforts.
3. Les e-fuels utilisent de l'hydrogène "vert" (issu d'une électrolyse faite avec de l'électricité décarbonée) et du CO<sub>2</sub> capté directement dans l'atmosphère. Le procédé est au point, avec une usine au Chili qui l'utilise exclusivement pour du carburant automobile. C'est la voie la plus prometteuse mais elle demande

sous forme électrique deux fois plus "d'énergie verte" que celle qui est stockée dans le carburant ainsi produit.

### 2.2.1 Les bio-carburants (bio-SAF)

Ce sont pratiquement les seuls utilisés actuellement. Leur prix est actuellement quatre fois plus élevé que celui du Jet-A1 mais non prohibitif vu les faibles quantités de "blend" et devrait notablement baisser avec l'augmentation de la production.

Leur usage est répandu depuis longtemps dans le transport terrestre (bio-diesel etc.) avec leurs variantes oléagineuses. Une version dite de deuxième génération utilisant plus complètement la plante (ligno-cellulosique) se développe peu à peu.

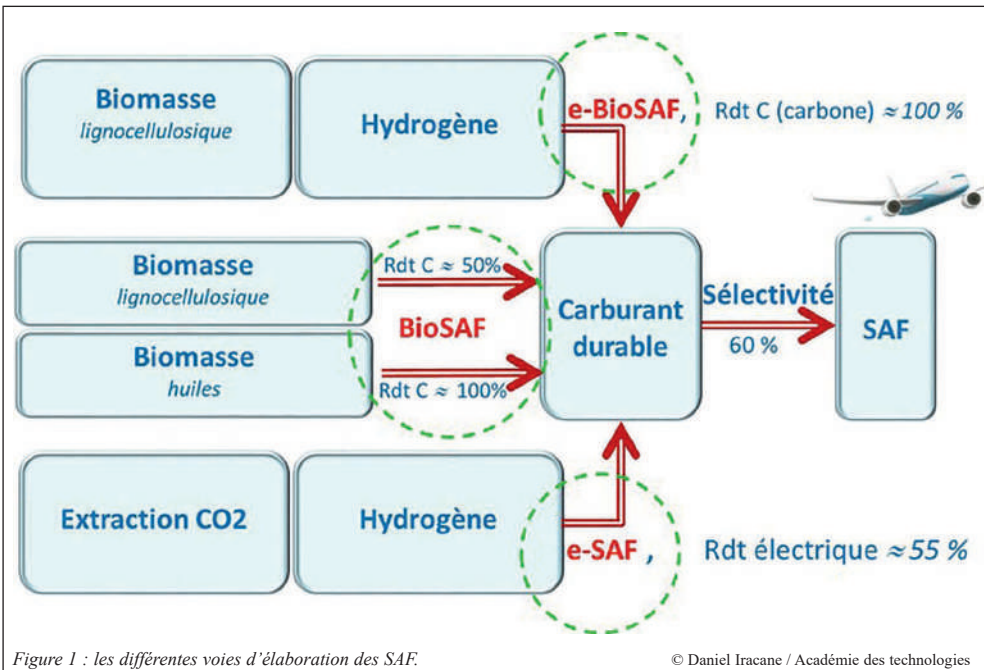


Figure 1 : les différentes voies d'élaboration des SAF.



D'après l'étude faite par l'Académie des technologies<sup>16</sup>, compte tenu de la surface de bio-cultures requise pour leur production et de la concurrence avec d'autres secteurs utilisateurs, le volume disponible pour l'aviation en Europe ne dépassera pas **20 % des besoins**<sup>17</sup>, l'objectif de ReFuelEU étant de 35 %...

Faire plus ? Si les bio-cultures ne suffisent pas, les déchets agricoles et forestiers (collectés) qui alimentent déjà de nombreux méthaniseurs pourraient devenir plus disponibles. Le passage du méthane au carburant liquide étant possible efficacement, cette voie peu citée mérite un deuxième examen. Il ne faut cependant pas en espérer des miracles :

- la "main du marché" ne suffira pas. Il faudra des arbitrages politiques, prenant en compte le peu d'alternatives pour le transport aérien afin de lui flécher de façon prioritaire cette biomasse et non vers des usages où l'électrification directe est plus efficace, comme pour le transport routier ;
- il existe encore des problèmes d'industrialisation pour les biocarburants de deuxième génération, ce qui retarde leur disponibilité.

---

***Donc : Ne pas espérer obtenir plus de 20 % de biocarburants pour les vols au départ d'Europe. Par contre, s'assurer de cette quantité par des contrats à très long terme.***

***Explorer cependant plus avant la piste des déchets et des méthaniseurs...***

---

### **2.2.2 Les e-biocarburants (e-bioSAF)**

Il s'agit d'une variante des biocarburants "dopée" à l'hydrogène, utilisant donc plus complètement le carbone des plantes, mais demandant de l'énergie externe (10 kWh/kg). Il semble souhaitable pour l'occupation des sols de substituer cette formule aux biocarburants ci-dessus car ils requièrent **deux à trois fois moins de terrain...** mais il faut disposer d'énergie "bas carbone" et donc avoir investi pour cela.

---

***Donc : La pression pour l'occupation des terres en Europe et la disponibilité d'hydrogène "vert" devraient favoriser la transition vers l'élaboration des e-biocarburants.***

---

---

<sup>16</sup> Académie des technologies, juin 2023 : "La décarbonation du secteur aérien par la production de carburant durable" – <https://shorturl.at/qAQV7>

<sup>17</sup> Ce 20 % vient d'une appréciation sur le ratio de la bioénergie que pourra capter l'aviation : 10 %.



### 2.2.3 Les e-fuels (e-SAF)

Pour le **moyen et long terme**, il est indispensable de développer les **e-fuels**, alternatives complémentaires aux biocarburants. Complètement synthétiques, issus du gaz carbonique prélevé dans l'atmosphère et d'hydrogène électrolytique, ils ne demandent "que" de l'énergie mais le rendement de 50-55 % entre l'énergie requise et l'énergie stockée dans l'e-fuel mène, d'une part à une considérable demande d'électricité "verte", d'autre part à un coût élevé de deux à trois euros par litre (pour un coût du MWh de 50€). L'UE ayant décidé qu'une incorporation minimale de 35 % serait exigée en 2050, la plus grande difficulté vue d'aujourd'hui est l'assurance de disposer de suffisamment d'énergie "verte".

---

*Les procédés de fabrication existent mais l'industrialisation massive n'a pas commencé.*

---

### 2.2.4 L'hydrogène comme intrant

Issu d'électrolyse ou d'autres processus utilisant de l'énergie "verte", l'hydrogène est présent dans les usines d'e-fuel et d'e-biofuels. Il est également présent dans le transport terrestre et dans de nombreux processus industriels. Sa disponibilité pour élaborer les e-fuels dépend donc, comme

pour les autres secteurs, de l'investissement en énergie qui alimente ses usines.

---

*Tous ces carburants, sauf les biofuels actuels, et encore<sup>18</sup>... vont exiger des quantités considérables d'énergie.*

---

## 2.3 Les émissions "négatives" par captage et séquestration du CO<sub>2</sub>

Le coût énergétique du captage et de l'enfouissement du CO<sub>2</sub> atmosphérique ou de sources industrielles est déjà inférieur à celui de la synthèse des carburants et semble encore loin du minimum atteignable<sup>19</sup>. On peut espérer que le coût économique, aujourd'hui peu encourageant, décroîtra avec une industrialisation massive. Ce procédé, cité dans les rapports du GIEC, aurait un potentiel (géologique) suffisant pour jouer un rôle complémentaire, au moins local et/ou temporaire dans la décarbonation, lorsqu'il aura atteint le niveau de maturité nécessaire.

Pour l'extraction du CO<sub>2</sub> atmosphérique, une usine pilote est en service depuis deux ans en Islande et une autre usine, plus importante y est en construction ; d'autres sont en construction aux États-Unis. Le transport et la séquestration du CO<sub>2</sub> semblent à TRL (*Technology Readiness Level*) 6 à 9 suivant

---

<sup>18</sup> On ne parle pas souvent de l'empreinte carbone des cultures dédiées à ces biofuels !

<sup>19</sup> Académie des technologies, communication privée.

les procédés, dont certains sont déjà utilisés à l'échelle des millions de tonnes par l'industrie pétrolière.

Il existe d'autres procédés de création "d'émissions négatives". On en citera un, original, en test sur la côte marocaine, la culture d'algues avec enfouissement des algues sèches. Les mesures plus classiques<sup>20</sup> sont la reforestation, le biochar<sup>21</sup>, la valorisation de biomasse, la minéralisation et altération des roches...

Certains acteurs du secteur ont commencé des achats à terme<sup>22</sup> de centaines de milliers de tonnes de séquestration de CO<sub>2</sub> pour compenser tonne pour tonne les émissions de leurs avions.

Le captage et la séquestration du CO<sub>2</sub> seraient donc un levier permettant de "décontraindre" l'aérien. Cependant, le coût doit baisser, les lieux de stockage à long terme doivent être confirmés et les quantités estimées.

Ces techniques de captage/séquestration de CO<sub>2</sub>, qui peuvent être qualifiés "d'émission négative" pour les distinguer du terme "compensations" plus vague et parfois proche du "green washing", sont assez proches du

captage atmosphérique de CO<sub>2</sub>, de son utilisation pour synthétiser les e-fuels puis de sa réémission par les moteurs, l'ensemble du processus se déroulant alors au sein de la "filrière". Ces "émissions négatives" devront être mesurables, vérifiables et politiquement acceptables.

Un complément de kérosène fossile, qui pourrait atteindre jusqu'à 12 millions de tonnes, pourrait rester à "neutraliser" au-delà des 70% de SAF exigés par ReFuelEU. La voie la plus prometteuse aujourd'hui, soutenue par le GIEC, et de plus en plus "visible", est celle du captage et du stockage du CO<sub>2</sub> atmosphérique.

---

***Donc : Soutenir les investissements dans les installations de captage de CO<sub>2</sub> et de séquestration.***

---

## 2.4 La sobriété

La sobriété, devenue en Europe une question de société, est une notion aux contours variables, qu'il faut distinguer de l'efficacité énergétique, même si les deux options sont intimement liées : la première concerne les comportements et les usages, la seconde les solutions techniques et opérationnelles. La première est plus complexe et plus contro-

---

20 "Élimination du CO<sub>2</sub> atmosphérique, Introduction aux procédés à émissions négatives", 07/2022, CarbonGap, Mines Paris – <https://shorturl.at/ivLM7>

21 Ou "agrifar" : amendement des sols par une poudre d'origine végétale proche du charbon de bois.

22 Aux États-Unis, notamment.

versée. Mais il nous paraît impossible de l'éluider.

Le plus important est de se débarrasser des postures et des *a priori* de part et d'autre. **L'aviation *bashing* est injuste** ; à l'inverse, le refus techniciste de questionner la voracité énergétique des sociétés contemporaines, aviation comprise (à sa juste place, ni plus, ni moins) serait une impasse.

La sobriété peut être volontaire, voire spontanée, très individuelle ou au contraire organisée au niveau de la société ou découler du marché.

Découler du marché ? **Plus** importante sans doute que le seul prix du carburant, l'augmentation du prix de l'énergie décarbonée par rapport à celui de l'énergie fossile et facile d'aujourd'hui aura des répercussions inévitables sur la consommation *en général* et par conséquent sur la consommation de transports.

Il s'agit là d'une sobriété forcée. Des taxes sur le transport aérien auraient le même effet. Il est possible de tout imaginer et même, puisque la proposition en a été faite, un rationnement autoritaire des voyages en avion....

Mais, plus que sur d'éventuels effets mécaniques ou autoritaires, il est intéressant et nécessaire de s'interroger sur l'évolution possible des mentalités, sachant que celle-ci peut aussi accompagner la contrainte économique ; sachant surtout qu'un encouragement public, sous forme d'éducation, d'incita-

tions positives, d'infrastructures, etc., en est certainement une condition.

Il serait hasardeux de croire que des usages auxquels nous sommes habitués mais qui n'existent que depuis une ou deux générations seraient immuables.

En fait, les évolutions d'usages sont souvent plus rapides qu'imaginées et parfois inattendues. Il serait très naïf de croire que l'engouement manifesté pendant l'été 2023 par les Européens et surtout les jeunes, envers le voyage en avion, clôt le débat une fois pour toutes, renvoyant les partisans d'une modération des vols aux oubliettes de l'histoire.

Il est vrai que le **tourisme lointain** (pour lequel l'avion n'est pratiquement pas substituable) fait partie intégrante de notre civilisation planétaire, malgré les inégalités qui le marquent. Aller faire la connaissance d'autres pays et d'autres cultures, même superficiellement, est une donnée essentielle du sentiment d'appartenance "à la planète". Il est même plausible que sans la capacité de voyage lointain, la conscience environnementale ne serait pas là où elle en est. Le souci de la planète n'est ressenti qu'en quittant son jardin !

Cependant il n'est plus guère possible d'éluider la question de *ce qui compte vraiment*, sur le plan sociétal cette fois. Comme tous nos comportements, la décision de prendre l'avion inclut du superflu et de l'inutile. La société européenne doit choisir entre l'ébriété

actuelle qui préside à ses modèles mentaux et une sobriété choisie. Le transport aérien fait partie de cela. Non par un rationnement quelconque. Mais par une évolution des mentalités, progressive, déjà visible.

C'est le cas également des **voyages professionnels**, qui ne vont évidemment pas disparaître mais pour lesquels, dans de nombreux cas, les téléconférences, désormais bien rodées, constituent un substitut qui satisfait à la fois les directions des entreprises et les salariés concernés. En l'occurrence, ce mouvement n'est pas seulement européen, mais mondial.

Il est cependant manifeste que cette réflexion sur la sobriété a pris corps essentiellement en Europe, pour le moment. Mais de leur côté, les États-Unis sont traversés par des courants de pensée très divers, parmi lesquels le souci environnemental prend une place importante. La Chine suit son propre chemin, l'urgence, pour elle, étant d'abord de lutter contre la pollution. L'Asie en général et l'Afrique sont dans une phase où la croissance du transport aérien, considérée comme une condition du développement, est encouragée. **Pour l'Europe, agir seule sans se préoccuper du reste du monde n'aurait pas de sens. Sans se considérer comme le Messie du climat, il faut qu'elle soit capable de discerner les évolutions chez les autres et d'agir en conséquence.**

En fait, la sobriété aérienne n'est pas tant un levier supplémentaire de décarbonation qu'un cadre nouveau, un environnement socio-politique dont il faut essayer d'anticiper les contours. **Il serait bon que le secteur aérien dans son ensemble s'en saisisse avec sincérité**, comme quelques-uns de ses acteurs l'ont déjà fait, plutôt que de se placer dans la seule perspective de la croissance la plus élevée possible.

---

*Donc : Comme l'ensemble de l'activité économique, le transport aérien est susceptible d'évoluer (au moins en Europe dans un premier temps) vers plus de sobriété dans ses usages tant professionnels que privés : il devrait, dans cette perspective, contribuer activement à la redéfinition du voyage de demain. C'est un élément qui doit être pris en compte dans l'étude prospective de scénarios préconisée plus haut.*

*Adopter une telle attitude ne peut qu'aider à faire comprendre que la même sincérité préside aux actions de décarbonation à entreprendre et à l'appel aux lourds investissements correspondants.*

---

## 3- LA QUESTION DE L'ÉNERGIE

### 3.1 Les besoins de l'aéronautique

#### 3.1.1 Quels besoins en carburants aéronautiques et en électricité décarbonée<sup>23</sup> ?

Quels que soient les scénarios, les émissions de CO<sub>2</sub> resteront directement proportionnelles à deux facteurs-clés : le trafic exprimé en passager x kilomètre transporté (pkt) et la consommation moyenne de carburant par pkt.

L'AAE a donc concentré ses travaux sur ces deux facteurs et bâti un "cas de base" correspondant aux hypothèses et prévisions publiées qui nous semblent les plus vraisemblables, avec des études de sensibilité comprenant des variations à la hausse comme à la baisse de ces deux

paramètres afin de dégager les grandes tendances en besoin d'énergie primaire.

#### 3.1.2 Comment produire les quantités de SAF requises en 2050 ?

Dans l'Union européenne, il faudra dans le "cas de base" **fournir** en 2050 **environ 40 millions** de tonnes de carburants nécessaires aux vols décollant sur son territoire.

Le règlement ReFuelEU Aviation impose qu'en 2050 le taux minimum d'incorporation de SAF soit de 70 % (*on a vu plus haut que la disponibilité de biofuels pour le transport aérien devrait plafonner vers 20 % et non 35 % comme ReFuelEU le prévoit, et donc qu'il faudra environ 50 % d'e-fuels*).

---

<sup>23</sup> L'ensemble détaillé des calculs et hypothèses est disponible sur le site de l'AAE.

Nous montrons plus loin que, sauf bouleversement technologique permettant de remplacer l'électrolyse de l'eau pour la production d'hydrogène vert par un procédé moins électro-intensif, la tension sur la disponibilité d'électricité décarbonée rendra difficile de dépasser ce taux d'incorporation de 70 %, sauf recours massif aux importations en provenance de pays mieux favorisés en termes d'espaces naturels, de climat et de coûts.

Dans l'Union européenne, il faudrait donc **créer une filière industrielle produisant des SAF**, fournissant à l'UE au moins 70 % des 40 millions de tonnes nécessaires aux vols décollant sur son territoire, soit 28 millions de tonnes/an... et ceci à des prix compétitifs.

Il ressort du cas de base et des analyses de sensibilité (cf. note 21) que les besoins en électricité décarbonée pour produire ces SAF seraient plus probablement de **~650 TWh/an** – à l'intérieur d'une fourchette de 450- 900 TWh/an, avec le taux visé de 70 % de SAF dans le mix carburants (les 30 % restants feraient l'objet de compensations par captage et séquestration du CO<sub>2</sub>). Ces ordres de grandeur correspondent à **nettement plus que la consommation électrique actuelle totale de grands pays comme l'Allemagne ou la France.**

L'importance de ces besoins s'explique par le fait que l'élaboration des carburants "e-fuels" exige en électricité deux fois l'énergie qu'ils contiennent<sup>24</sup>.

La disponibilité massive d'électricité bas carbone sera donc déterminante dans la décarbonation de l'aérien.

Nous montrons plus loin en section 3.2 que **ces besoins d'électricité décarbonée représenteraient de l'ordre de 11 % de l'ensemble des besoins du reste des usages de la société, déjà en soi difficiles à satisfaire.**

En conséquence, **une concurrence féroce entre usages** pour l'accès à la ressource électrique bas carbone disponible sur le marché **est fortement probable.**

Le jeu d'un marché laissé à lui-même amènerait à attribuer la ressource rare d'électricité décarbonée aux secteurs et aux usagers les plus offrants, ce qui serait politiquement et socialement difficilement acceptable.

Des arbitrages politiques seront nécessaires, **dans lequel le transport aérien, via son fournisseur producteur de SAF, devra être actif dans les décisions de priorisation pour sauvegarder ses approvisionnements.**

<sup>24</sup> Au contraire le transport terrestre peut passer directement au moteur électrique, avec une économie immédiate de plus de 50% sur l'énergie primaire (car on évite, avec l'électricité "en direct", le rendement faible (30-40%) des moteurs thermiques) et on n'aurait donc aucun intérêt à privilégier le recours aux carburants de synthèse.

### 3.1.3 Quels coûts, quels investissements ?

Le coût des SAF dépendra essentiellement (à ~80 %) du coût de l'électricité. Si on table sur 50€/MWh, le prix des SAF en 2050 pourrait être de l'ordre de 2€/litre, donc ~ trois fois le prix du jet-fuel fossile des dernières années, mais moins de deux fois plus que le prix du jet-fuel d'origine fossile en 2050 **actuellement prévu**, compte tenu du coût des compensations et d'une évolution probable du coût du pétrole<sup>25</sup>.

Dans l'UE, l'investissement concernant la production d'énergie électrique serait dans le cas de base de ~800 G€, celui dans les usines de production de SAF étant de ~200 G€. C'est ainsi que pour une production de ~28 millions de tonnes/an de SAF, l'investissement pèserait ~1 000 G€ dans le cas de base, et suivant les scénarios, entre 600 et 1 200 G€.

### 3.1.4 Quel impact de ces coûts supplémentaires sur le trafic ?

Il est hasardeux de prédire l'évolution des tarifs tant l'usage de l'avion est déjà en train d'évoluer, à commencer pour les voyages

d'affaires. Les nombreuses prévisions actuelles sont rarement à la baisse du trafic, même si une certaine sobriété est souvent évoquée.

Aux conditions actuelles, le coût complet moyen du kilomètre-passager est de l'ordre de 7 centimes<sup>26</sup>. Le carburant y contribue **en moyenne** pour un tiers<sup>27</sup>. En conséquence, si le coût du carburant triplait (quadruplait) et que la consommation kilométrique chutait de 30 % le coût kilométrique n'augmenterait "que" de 40 % (60 %). L'impact du coût des carburants sur celui des transporteurs à l'horizon 2050 est donc sujet à un fort effet "amortisseur", ce qui réduit l'importance des incertitudes sur les coûts des SAF.

Il est probable qu'avec l'accroissement de la production et les progrès des méthodes, le coût unitaire des SAF baissera. Par ailleurs, le modèle économique du transport aérien pourrait encore évoluer et réduire un peu l'impact tarifaire.

Toujours est-il que l'impact sur les vols très longs<sup>28</sup>, les plus générateurs d'émissions, le supplément par rapport à aujourd'hui serait

<sup>25</sup> Du fait de la diminution du taux de rentabilité énergétique des investissements de l'exploration-production.

<sup>26</sup> Tous business models des transporteurs aériens confondus (les coûts unitaires variant de 4 à 12 centimes).

<sup>27</sup> Entre 27% pour les moyen-courriers et 40% pour les long-courriers, tous business models des transporteurs aériens confondus.

<sup>28</sup> L'impact sur les vols courts ne devrait pas être important, le coût complet restant proche voire inférieur à celui du transport terrestre.

de l'ordre de 1 à 1,5 €/100 km donc 120 à 180€ sur un aller-retour Europe-New York<sup>29</sup>.

### 3.2 La disponibilité d'énergie "verte" au-delà du transport aérien<sup>30</sup>

Dans la perspective de la décarbonation, les besoins du transport aérien s'inscrivent dans le contexte d'un immense besoin de l'ensemble des usages de la société en productions supplémentaires d'énergies renouvelables/décarbonées.

Ce constat est partagé par RTE<sup>31</sup>, pour la France, pourtant le pays le plus décarboné de l'Union européenne grâce au nucléaire.

Au niveau de l'UE dans son ensemble, ceci exigera de construire des moyens de production électrique "décarbonée" fournissant 5 000 à 6 000 TWh/an en 2050 (voir encart ci-dessous), **soit un doublement par rapport au niveau total actuel**, tout en remplaçant 60 % du parc actuel d'énergie d'origine fossile par des productions décarbonées, et le tout de façon acceptable en termes économiques comme d'acceptation par le corps social.

#### Quelques ordres de grandeur sur l'énergie dans l'Union européenne

La consommation d'énergie totale de l'UE est aujourd'hui de 16 000 TWh/an, dont 3 000 TWh/an sous forme d'énergie électrique.

La réduire d'un quart, comme prévu dans le scénario Net Zero Emissions (NZE) de l'Agence internationale de l'énergie (AIE), vers 12 000 TW/an serait une belle réussite.

D'ici 2050, il est prévu que la consommation d'énergie électrique double, passant de 3 000 TW/an (dont 1 700 TW/an déjà décarbonée) à 6 000 TW/an.

Afin de fournir ces 6 000 TW/an d'électricité décarbonée, il faudra donc pouvoir produire 3 000 TW/an d'énergie renouvelable supplémentaire (éolienne, solaire et nucléaire, et remplacer les 1 300 TW/an d'électricité non décarbonée actuels par du décarboné, soit au total pouvoir produire 4 300 TW/an de plus d'électricité décarbonée.

En ajoutant la capacité de production supplémentaire d'environ 1 100 TW/an nécessaire pour compenser l'intermittence du solaire et de l'éolien, on arrive à un besoin de construction de nouvelles capacités de production d'énergie électrique décarbonée 5 400 TW/an, à rapporter aux 1 700 TW/an actuels !

<sup>29</sup> Donc relativement marginal dans le coût complet d'un voyage, hôtel, etc.

<sup>30</sup> Les calculs détaillés sont disponibles sur le site de l'AAE.

<sup>31</sup> Ainsi que par l'Académie des sciences et l'Académie des technologies.



En supposant **pour illustrer** un partage 33/33/33 entre les différents modes de génération, il faudrait construire ou reconstruire d'ici 2050 dans l'Union européenne **de 110 à 120 tranches EPR en une cinquantaine de centrales, plus ~1 100 champs d'éoliennes offshore du type Saint Nazaire (~80 km<sup>2</sup> chacun) plus ~12 000 km<sup>2</sup> de panneaux photovoltaïques i.e. des milliers de fermes solaires de 2 à 3 km<sup>2</sup> complétées par beaucoup de solaire disséminé sur les toits, les parkings, etc.**

*NB : ces chiffres ne sont cités que pour donner **la mesure de l'effort**. À juste titre, ils sont impressionnants. Certains les écarteraient d'un revers de manche comme utopiques. Nous y avons réfléchi et espérons que des solutions existent, acceptables pour les territoires et les citoyens. Mais ceci dépasse le cadre du transport aérien ! Il revient aux électriciens de trouver et montrer le chemin du "comment".*

La décarbonation de la société dans son ensemble aura donc à surmonter des défis considérables :

### 3.2.1 Défis industriels

Difficulté à trouver des sites pour les unités de production renouvelables, et éventuellement pour les réacteurs nucléaires.

Disponibilité de disposer de personnel qualifié et de ressources physiques (voire énergétiques) pour la **construction** d'un tel nombre

d'unités de production d'électricité décarbonée.

### 3.2.2 Défis financiers

Trouver les capitaux nécessaires au financement des investissements requis.

À raison de 1,25 G€/TWh annuel pour construire les installations produisant les 5 000 à 6 000 TWh/an cités plus haut, ce serait de l'ordre de 6 500 G€ qu'il faudrait investir, soit 250 milliards d'euros par an jusqu'en 2050. Ce chantier de l'énergie absorbera plus de 10% des investissements productifs de l'Union européenne. *Et tous les à-côtés de ces installations ne sont pas comptés ici ! Réseaux électriques à renforcer, gestion du réseau qualitative et quantitative, routes d'accès, investissements du côté des utilisateurs...*

À 26 années de 2050 et vu les délais de mise en place d'un tel ensemble industriel, **c'est un programme d'investissement sans égal depuis la reconstruction d'après-guerre qui est devant nous.**

Un tel investissement ne peut être le seul fait des États qui ont déjà bien du mal à boucler leurs budgets. Et plus on attendra, plus le mur de l'énergie deviendra haut... ou reculera !

### 3.2.3 Défis sociétaux

- *Le nucléaire* : L'énergie nucléaire pourrait voir son expansion limitée ou ralentie en Europe à l'horizon 2050 du fait de très

fortes réticences d'une partie de la société, et pas uniquement en Allemagne. La reprise actuelle de la dynamique nucléaire dans nombre de pays demeure suspendue à des retours en arrière.

- *Les énergies renouvelables* : En théorie, le potentiel d'énergie "verte" (photovoltaïque, éolien, voire hydraulique) est énorme. Mais, capter, transformer, et concentrer cette énergie dans des conditions économiques et sociétales acceptables se heurte à des limites de rendement malgré les avancées technologiques (éolien et photovoltaïque *offshore*...)

L'énergie éolienne suscite des critiques sociétales concernant, entre autres, l'impact sur le paysage, qui se sont parfois muées en fortes oppositions de principe, surtout en France... Ceci nourrit indirectement des procédures bureaucratiques lourdes pour l'installation de tout parc éolien, pour lequel l'autorisation nécessite de 18 mois à... beaucoup plus !

La difficulté semble moindre pour les parcs *offshore*, qui ont en outre l'avantage d'une plus grande efficacité malgré un coût d'investissement plus élevé. Cependant pour produire 1 TWh/an (0,2% de la consommation d'un grand pays de l'UE) ils occupent 40 km<sup>2</sup>...

Reste à savoir à quel degré ceux-ci pourront être multipliés (par un énorme coefficient) et si tous pourraient être implantés dans des zones maritimes "acceptables"<sup>32</sup>.

Les "fermes photovoltaïques" bénéficient de plus de mansuétude de principe, ce qui n'exclut pas une réticence quasi générale à leurs implantations dans le voisinage.

À long terme, le photovoltaïque flottant en haute mer pourrait apporter une contribution significative.

À ces moyens industriels, il convient d'ajouter le photovoltaïque disséminé professionnel ou individuel, et l'agrivoltaïsme qui présentent de nombreux atouts, et dont l'usage viendra se retrancher aux besoins collectifs de grande dimension.

Pour l'éolien comme pour le photovoltaïque, dans l'éventualité où le nucléaire et l'hydraulique seraient insuffisamment développés pour gérer l'intermittence, il faudrait augmenter les capacités (15%?) pour alimenter des stockages permettant d'y faire face.

Le syndrome NIMBY ("*Not in my Backyard*") s'est renforcé au fil des décennies pour absolument tout type de projet industriel et a de beaux jours devant lui.

<sup>32</sup> Les autorisations et consultations pour l'éolienne *offshore* de test à 16km au large du Roussillon, auront duré sept ans.

Étant donné l'ampleur du déploiement des nouvelles unités de production électrique décarbonée, il paraît clair que la collectivité, à commencer par l'État, aura un rôle central pour convaincre et entraîner les citoyens vers l'équivalent d'un nouveau "contrat social".

Mais quel que soit le niveau où s'établira progressivement la disponibilité d'énergie décarbonée, la question des modes de vie dans ce nouveau contexte se pose elle aussi avec acuité.

Les efforts demandés à l'ensemble de la société pour se décarboner à l'horizon 2050, avant même prise en compte des besoins du transport aérien, seront donc très importants.

Au-delà de l'effort financier considérable qui sera demandé à l'industrie, les citoyens devront comprendre que le prix du maintien de nos sociétés avancées est l'acceptation de la multiplication dans leur environnement des moyens de production bas carbone, renouvelables et nucléaires. Ceci permettra aux pouvoirs publics de prendre des décisions robustes dans un climat sociétal apaisé.

Certains pays d'Europe se soucient peu d'indépendance énergétique et se proposent d'importer une grande part de leur électricité décarbonée. D'autres parlent de souveraineté énergétique et voudraient se débarrasser de la rente pétrolière qui "plombe" leur balance des paiements. Au-delà des risques de dépendance géopolitique afférents, il est probable que se développera une forte concurrence entre pays pour avoir accès à ces ressources.

### 3.3 Que devrait faire le transport aérien pour assurer ses approvisionnements en SAF ?

Le besoin en électricité décarbonée devrait dans le cas le plus probable<sup>33</sup> se situer autour de 650 TWh/an, soit ~11 % de la production totale de la société. Il s'agit d'un chiffre élevé,

tant en valeur absolue qu'en proportion des besoins totaux de la société.

Mais le problème pour le transport aérien n'est pas tant l'importance relative de ses besoins par rapport à ceux du reste des usages que le fait que ces ~11 % représentent une quantité considérable dans l'**absolu, venant s'ajouter** à une masse énorme de besoins dont on constate à quel point ils

<sup>33</sup> Nos conclusions sont invariantes dans l'ensemble du champ couvert par les analyses de sensibilité (cf. les détails sur le site de l'AAE).

seront difficiles à satisfaire, non seulement financièrement mais physiquement et en termes d'acceptation par le corps social.

Ce point est à notre sens essentiel afin que le transport aérien structure et pilote son action face à l'effort général de décarbonation de l'ensemble de la société.

Des pistes d'action sont proposées dans ce qui suit.

Les États-Unis avec leur *Inflation Reduction Act*, qui au passage reconnaît l'intérêt social de l'aviation, se sont engagés en 2022 dans la voie des carburants "verts" en subventionnant leurs industriels à travers des crédits d'impôt, de manière à amorcer un cycle vertueux de production et de consommation, **ce qui est déjà constaté** (2023).

En Europe, il semblerait que le transport aérien ait intérêt à être proactif :

► **Plan A : l'approche à privilégier consisterait à favoriser la création d'une filière industrielle e-fuels et e-biocarburants, et le développement de la filière biocarburants dans l'Union européenne.**

Approche contractuelle : le transport aérien devrait se rapprocher des producteurs de

SAF et des autres acteurs de la filière amont, à travers des structures de coordination à l'échelle européenne<sup>34</sup>.

Ainsi, pour se garantir l'accès à des quantités suffisantes de biofuels, les compagnies aériennes européennes signent déjà des contrats d'approvisionnement à long terme avec des fournisseurs lointains, faute d'en trouver sur place.

De façon à pouvoir en faire autant pour les e-fuels, la filière industrielle e-fuels n'existant pas encore, il s'agit d'en amorcer la constitution en Europe.

Le prix plus élevé des e-fuels, suppose que les institutions européennes mettent en place des mesures, notamment fiscales et autres aides transitoires, permettant d'éviter les distorsions de concurrence vis-à-vis des transporteurs aériens des pays n'ayant pas adopté la même approche en termes de décarbonation.

À la manière des PPA<sup>35</sup>, courants dans le domaine de l'énergie, une approche contractuelle, avec une chaîne de contrats de fourniture à long terme entre les compagnies aériennes, les raffineurs-chimistes et les électriciens devrait permettre d'accélérer la constitution d'une industrie d'e-fuels en Europe.

34 "L'Alliance Renewable and Low Carbon Fuel" (RLCF), initiative au niveau de l'UE, va lancer un groupe de travail dont les objectifs sont cohérents avec cette recommandation.

35 PPA : Power Purchase Agreement.

Maintenant que les besoins en millions de tonnes de e-fuels et e-biocarburants et de TWh/an sont identifiés<sup>36</sup>, les compagnies aériennes pourraient, à travers les trois grandes alliances, rechercher des accords de fourniture à long terme avec les producteurs de carburants aviation.

Ce faisant, ces producteurs, à présent assurés de leurs débouchés en quantité et en prix, pourraient lancer les investissements de production d'e-fuels à l'échelle des besoins 2050 après s'être engagés à leur tour vis à vis des électriciens qui investiraient à proportion dans la production d'électricité décarbonée, constituant ainsi une chaîne de "PPA-généralisés".

Une telle approche aurait en outre l'avantage de déplacer une grande partie du poids du financement des investissements vers un amont sécurisé sur ses débouchés.

---

***Donc : Le secteur aérien et les pouvoirs publics européens devraient susciter des investissements massifs dans la production de SAF, notamment par un affichage clair des besoins du transport aérien, une stratégie réglementaire stable et une visibilité accrue sur la demande future ; et encourager les accords contractuels à long terme entre compagnies aériennes, raffineurs et énergéticiens.***

---

En parallèle, il faut également souhaiter que **face à la concurrence des usages** les arbitrages d'accès à la biomasse donnent à l'aviation une place à la hauteur de ses irremplaçables atouts économiques et sociétaux, qui doivent certainement être mieux connus, démontrés et défendus.

Il est malgré tout possible qu'il faille avoir recours à une proportion d'importations d'e-fuels, avec les risques de dépendance afférents ; là aussi, une anticipation est nécessaire pour que les carburants de l'aviation y trouvent leur juste place, **d'autant qu'on peut prévoir une concurrence pour l'accès à la ressource.**

---

***Donc : Les pouvoirs publics européens et nationaux devront effectuer les futurs arbitrages pour l'accès à la biomasse d'une part, aux importations de carburant vert d'autre part, à la hauteur de l'utilité sociale et économique de l'aviation.***

---

---

***Donc : De tels arbitrages, pour être favorables (via des règlements ? comme l'incorporation de bio dans les carburants routiers aujourd'hui ?), exigent que les dirigeants politiques et l'ensemble de la société soient convaincus, mieux qu'ils ne le sont aujourd'hui, que les atouts économiques et sociétaux du transport aérien les justifient.***

---

---

<sup>36</sup> L'Alliance RLCF commence à publier des chiffres, qui s'avèrent cohérents avec les nôtres.

En parallèle, le transport aérien se doit d'agir pour favoriser le développement de technologies alternatives pour la production d'hydrogène vert, qui permettraient de diminuer significativement le besoin en TWh en électricité décarbonée.

Ceci pourrait se faire par une implication active, y compris financière, dans les recherches et développement en cours (plasma et autres hydrogène turquoise, hydrogène blanc, etc.), ou à venir.

► **Plan B : si le transport aérien ne trouve pas en Europe suffisamment de carburants décarbonés, il lui faudra envisager d'en importer de façon massive.**

Cette approche impliquerait le remplacement d'une dépendance géopolitique et économique aux hydrocarbures importés par une dépendance similaire à l'énergie décarbonée importée, et un renoncement à se débarrasser de la rente pétrolière qui "plombe" leur balance des paiements : Il s'agit ici de (jusqu'à) 40 millions de tonnes à 2,5€ le kg, donc **100 milliards d'euros par an**.

En tout état de cause, on n'échappera pas là encore à **une concurrence entre usages et entre pays** pour l'accès à ces importations.

## 4- LES EFFETS HORS CO<sub>2</sub> DU TRANSPORT AÉRIEN

L'impact climatique, et plus généralement environnemental, du transport aérien présente quatre composantes :

- les émissions de CO<sub>2</sub>, essentiellement par la combustion de carburant fossile, sujet principal du présent document ;
- les émissions d'oxydes d'azote (dites "NOx") et de traces d'autres gaz ;
- les traînées de condensation et les cirrus induits ;
- les autres effets : bruit, pollution, occupation des sols, accidents, etc.

**Pour mémoire** : le CO<sub>2</sub>, gaz à effet de serre est la composante principale et la plus certaine du transport aérien au changement climatique. Sa durée de vie dans l'atmosphère est longue **donc il s'accumule**, le transport aérien représentant entre 2,5 % et 3 % des émissions mondiales de ce gaz.

**Les émissions d'oxydes d'azote**, d'imbrûlés et de traces d'autres produits de combustion sont d'un ordre de grandeur bien moindre. Elles sont continûment réduites par les motoristes et donc ne demandent pas le niveau d'effort qui est nécessaire pour stopper l'accumulation de CO<sub>2</sub> dans l'environnement.

**Les traînées de condensation** sont provoquées par le passage d'un avion ("contrails") dans une zone d'air très froid sursaturée d'humidité.

Les autres effets sur l'environnement ou "externalités" sont : accidents, pollution de l'air, pollution, bruit, dommages à l'environnement etc. Ils ont été recensés pour tous les moyens de transport dans une étude demandée par la Commission européenne au cabinet d'experts CE Delft en 2019.

## 4.1 Les traînées de condensation (“contrails”)

Les “effets hors CO<sub>2</sub>” des traînées de condensation et des nuages (de type cirrus) qu’elles induisent résultent de la différence entre un effet “parasol” et un effet “réchauffant”. Cette différence est aussi difficile à mesurer qu’à modéliser. Son effet, à la différence du CO<sub>2</sub> qui s’accumule dans l’atmosphère pour des décennies, est éphémère (quelques minutes à quelques heures), non cumulatif<sup>37</sup> et donc n’est pas directement ajoutable aux cumuls de CO<sub>2</sub> liés à la combustion. Le doublement des émissions souvent affiché aujourd’hui est donc un raccourci scientifiquement discutable.

### Un peu de physique

Les traînées de condensation provoquées par le passage d’un avion (contrails) dans une zone d’air très froid en altitude sursaturée d’humidité ont des effets climatiques complexes mais temporaires. Ces traînées sont principalement dues à l’émission par les moteurs de vapeur d’eau venant de la combustion du carburant mais aussi aux microparticules carbonneuses (imbrûlés de

la combustion) qui déclenchent la formation de microcristaux de glace lesquels, soit se résorbent très vite (traînées éphémères sans impact significatif), soit propagent cet effet de proche en proche jusqu’à former des nuages d’altitude (cirrus), plus ou moins étendus et plus ou moins durables<sup>38</sup>.

Ces nuages sont voisins en apparence des cirrus naturels (de types variés) qui couvrent plus de 20 % de la surface terrestre et dont l’effet climatique est complexe : ils arrêtent (le jour) une partie du rayonnement solaire, créant un effet refroidissant dit “parasol”, mais ils arrêtent aussi (jour et nuit) une partie du rayonnement infra-rouge (thermique) qui monte vers l’espace, créant un supplément d’effet de “serre”.

Ces deux effets antagonistes sont de l’ordre de la dizaine ou quelques dizaines de watts mètre carré chacun, pour les cirrus naturels, mais c’est leur différence de l’ordre de deux ou trois watts par mètre carré qui compte !

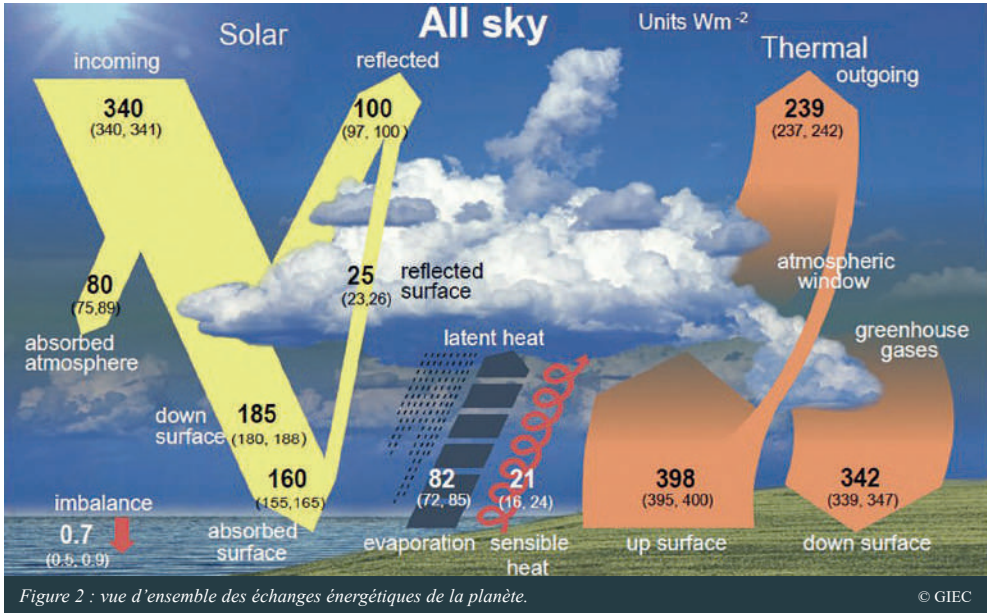
La mesure de cette différence est difficile et son estimation par le calcul est tout aussi délicate. En majorité les chercheurs leur attribuent un effet “réchauffant”, l’effet de serre l’emportant sur l’effet d’albédo<sup>39</sup>. Des

37 Mais les calories absorbées par la Terre durant la vie du cirrus ne disparaissent pas instantanément... Les cumuls de CO<sub>2</sub> vont, quant à eux, réchauffer en permanence la planète pendant des dizaines d’années, voire plus...

38 L’utilisation d’hydrogène comme carburant augmenterait la quantité de vapeur d’eau mais réduirait à zéro les imbrûlés carbonés. On ne sait pas aujourd’hui ce que deviendraient alors ces contrails.

39 Albédo : pouvoir réfléchissant du rayonnement lumineux solaire, maximum pour la neige fraîche, minimum pour une peinture noir mat, l’océan ou la forêt. L’effet des contrails est pour une part un effet d’albédo.





mesures de rayonnement depuis le sol ou par des satellites ainsi que des prélèvements *in situ* au cours de campagnes de mesures aéroportées sont faites en vue de recouper leurs calculs mais il faudrait, pour aller plus loin, disposer d'énormément de données sur les dimensions et les formes des microcristaux de glace, très variées et complexes à obtenir, de plus ces effets dépendent de la latitude, de l'albédo des sols, de la présence d'autres couches nuageuses etc.

Les cirrus induits par les traînées de condensation (0,1% de la surface terrestre) auraient

un effet d'un type voisin de celui des cirrus naturels, de même signe, globalement 40 fois plus faible ( $\sim 50 \text{ mW/m}^2$  au lieu d'environ  $2 \text{ W/m}^2$ )... mais localement cinq fois plus "efficace" eu égard à la surface concernée.

Les études compilées par le GIEC donnent une vaste fourchette de résultats allant d'un effet très petit à un effet double ou triple de celui du  $\text{CO}_2$  aéronautique... Quelques indices plutôt rassurants ont été recueillis pendant la quasi suspension des vols de la période Covid (quatre références importantes en note ci-dessous)<sup>40</sup>. La tendance

<sup>40</sup> Voir Schumann (février 2021) "Aviation signals become discernible in the observed differences of these data between 2019 and 2020", Gettelmann (mars 2021) "no significant annual averaged ERF from contrail changes in 2020", Digby (septembre 2021) "our analysis suggests that its warming effect from cirrus changes may be smaller than previously estimated". Mais aussi Qaas (+ Boucher, mars 2021) "The change in cirrus translates to a global radiative forcing of  $61 \pm 39 \text{ mW m}^{-2}$ . This estimate is somewhat smaller than previous assessments".

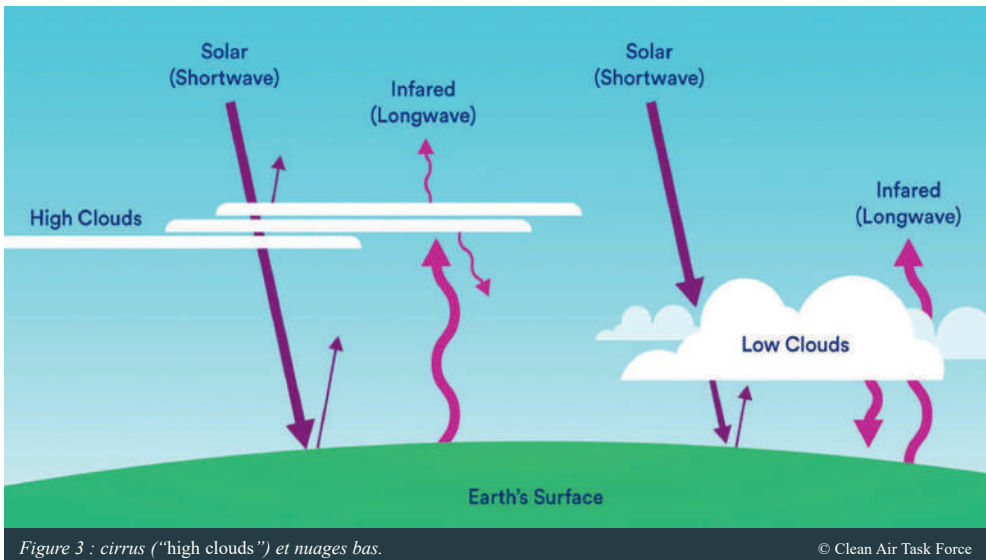
générale irait plutôt dans le sens d'une diminution des effets.

Mais il manque toujours une mesure directe bien qu'une méthode pour l'obtenir ait été proposée dès 1984<sup>41</sup>. On traque quelques dizaines de milliwatts/m<sup>2</sup> dans un système climatique tel que le montre la figure "All sky" du GIEC en page précédente où les incertitudes sur les termes principaux vont jusqu'à une dizaine de watts !

La recherche sur ce sujet est active depuis plus de vingt ans, y compris, récemment,

celle des remèdes qui devraient être apportés si l'effet de "serre" l'emporte très nettement sur l'effet "parasol". C'est ainsi qu'on peut envisager d'éviter les zones à contrails à partir d'une extrêmement bonne connaissance de la météo **en temps réel**<sup>42</sup>... mais le faire actuellement *a priori* pourrait être contre-productif si l'effet total est faible et si l'évitement entraîne une surconsommation et donc une surémission de CO<sub>2</sub>.

On peut aussi imaginer de déclencher exprès des contrails là où leur effet est refroidi-



<sup>41</sup> Anne-Marie Mainguy (1984). Proposition d'un principe de mesure absolue du bilan radiatif basé sur l'accélérométrie spatiale. Démonstration de sa faisabilité à l'aide des résultats de l'expérience Castor/Cactus. Thèse, Université de Paris VI.

<sup>42</sup> Car ces poches d'air sursaturé d'humidité évoluent et se déplacent.

dissant ! Toujours est-il qu'une autre piste est également étudiée : les carburants "SAF" pauvres en composés aromatiques semblent générer 80 % moins de contrails que le kérosène habituel. On peut donc espérer que d'ici une dizaine d'années, cet effet éphémère aura quasiment disparu.

Un document récent co-signé par David Lee, un des chercheurs les plus écoutés sur les contrails, va dans le sens de ce que nous écrivons ici, c'est à dire la présomption d'une certaine surévaluation de leurs effets<sup>43</sup>. Un autre spécialiste renommé, Bernd Kaercher, a fait partie de la commission de l'AAE qui produit le présent rapport : il invite à la prudence tant qu'on ne dispose pas de résultats expérimentaux plus précis.

En ce qui concerne les métriques utilisées : la plupart des publications présentent en "équivalent CO<sub>2</sub>" les effets hors-CO<sub>2</sub> du transport aérien, prennent sans hésiter la valeur retenue par le GIEC dans sa large fourchette d'incertitude<sup>44</sup> et grosso-modo doublent et parfois triplent l'effet CO<sub>2</sub> des vols. On **additionne ainsi des effets cumulatifs et d'autres qui ne le sont pas**. Sans faire de grands calculs, on peut montrer l'étrangeté de la méthode : imaginons que l'an prochain le trafic baisse de 10 % partout

dans le monde avec les mêmes avions. Il y aura 10 % de moins d'effet climatique des contrails mais le CO<sub>2</sub> continuera à s'accumuler dans l'atmosphère, juste un petit peu moins vite ! Décroissance de l'un, croissance de l'autre !

---

***Donc : Légiférer sur les contrails avec le niveau de connaissance actuel nous semble peu rationnel et incohérent avec le traitement appliqué à toutes les autres sources anthropiques qui ont des effets hors CO<sub>2</sub> analogues comme le changement d'albédo des territoires accompagnant un changement d'usage et/ou l'artificialisation des terres.***

***Encourageons les scientifiques à affiner leurs modèles par des mesures. Au cas où l'amplitude de cet effet serait confirmée, des pistes sérieuses semblent exister pour éviter la formation de ces cirrus (ou même la provoquer là où leur effet est refroidissant).***

---

## **4.2 Autres effets sur l'environnement**

Ils ont été recensés pour tous les moyens de transport dans une étude demandée par la Commission européenne au cabinet d'ex-

---

<sup>43</sup> Keith P. Shine & David S. Lee, "Contrails Avoidance Challenges", 7 Nov 2023 : « Understanding of contrail climate effects is evolving; we are not confident that they are the biggest current contributor to aviation-induced climate change ».

<sup>44</sup> 50 milliwatts/m<sup>2</sup> dans une distribution de valeurs calculées de 20 à 150 mW/m<sup>2</sup>.

perts CE Delft en 2019 : “Sustainable Transport Infrastructure Charging and Internalisation of Transport Externalities”. Un coût est affecté à chaque “externalité” (accidents, pollution de l’air, effet climatique, pollution, bruit, dommages à l’environnement...). Par passager x kilomètre, du fait de

la très faible part de ses infrastructures l’aviation se classe remarquablement bien. Et sans même tenir compte des infrastructures, hors CO<sub>2</sub> l’aviation resterait encore en tête de **tous** les moyens de transport.

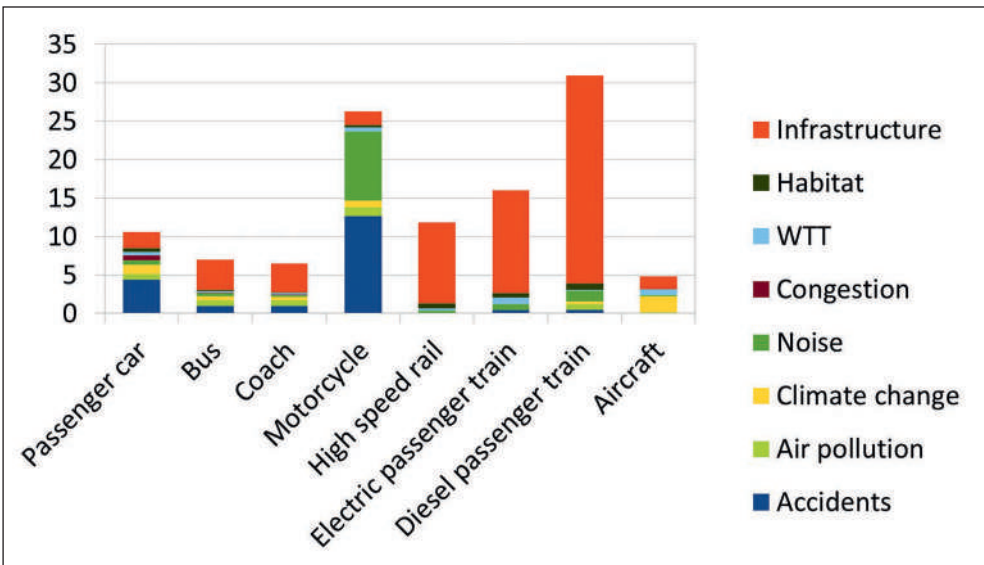


Figure 4 : schéma extrait des données détaillées du rapport CE Delft précité (Annex D, Final Total Average Cross Modal Comparisons).

NB : “climate change” means ~ scope 1 emissions, not Life cycle analysis of the effects. Costs cent-€/pkt. Average External & Infra costs Road & Rail for EU28, aviation for selected 33 airports (WTT : Well to tank). © CE Delft, May 2019

L’accumulation de CO<sub>2</sub> dans l’atmosphère est bien LE problème sur lequel agir sans tarder. En ce qui concerne les effets hors CO<sub>2</sub>, il faut :

- 1) poursuivre les travaux sur les contrails et ne légiférer, si nécessaire, que d’une manière cohérente avec la métrique appropriée ;
- 2) s’il s’avère que les contrails ont un effet climatique important, mettre en œuvre les procédés de réduction proposés : usage des nouveaux carburants SAF et, si nécessaire avec un minimum de surconsommation, pratique de trajectoires d’évitement des zones atmosphériques propices à ces phénomènes.

## 5- CONCLUSION

Il ressort de cette analyse que le transport aérien, seule solution pour le voyage lointain et tout à fait recommandable également pour un large éventail de trajets courts en raison de ses faibles “externalités” environnementales, est techniquement “décarbonable” mais risque de se heurter comme une grande part de la société à une pénurie d’énergie décarbonée. L’efficacité des avions et un peu de sobriété dans les usages réduiront la facture.

L’investissement européen à réaliser dans la production d’énergie d’ici 2050 est gigantesque (250 Md€/an d’ici à 2050) dont environ 10 % pour l’aviation. À défaut, on importera du carburant durable à raison de près de 100 Md€/an.

Une industrie lourde est à monter en un temps court ! Y sommes-nous prêts ?

Cet investissement devra faire face également à des refus locaux ou politiques si la société ne prend pas conscience de l’enjeu climatique. Des scénarios sombres menacent si l’énergie décarbonée n’est pas au rendez-vous. La question dépasse largement celle du transport aérien qui se voit un peu comme “le canari dans la mine”.

## Avis précédents

Avis n° 1 sur “L’Accident technique et faute pénale”, 2007

Avis n° 2 sur “Le Projet de règlement du Parlement européen et du Conseil sur les enquêtes et la prévention des accidents et des incidents dans l’aviation civile”, 2010

Avis n° 3 sur “Le Règlement européen sur la sécurité aérienne”, 2011

Avis n° 4 sur “L’Éruption du volcan Eyjafjöll d’avril 2010”, 2011

Avis n° 5 sur “L’Aviation de combat”, 2013

Avis n° 6 sur “L’Agence européenne de défense”, 2015

Avis n° 7 sur “Les Programmes de systèmes de défense en coopération européenne”, 2016

Avis n° 8 sur “La Stratégie européenne pour l’aviation proposée par la Commission européenne”, 2016

Avis n° 9 sur “L’Avenir des lanceurs européens”, 2019

Avis n° 10 sur “L’espace : quelle stratégie européenne pour les vols habités”, 2019

Avis n° 11 sur “Préparer une aviation verte tout en préservant le savoir-faire de développement d’avions de transport en Europe”, 2020

Avis n° 12 sur “Communications européennes sécurisées”, 2021

Avis n° 13 sur “Transport aérien en crise et défi climatique, vers de nouveaux paradigmes”, 2021

Avis n° 14 sur “La sécurité des activités dans l’espace : propositions pour une action européenne déterminée”, 2021

Avis n° 15 sur “De la référence magnétique à la référence géographique”, 2022

Avis n° 16 sur “Recommandations pour une indépendance européenne pour les vols habités”, 2023

Avis n° 17 sur “Recommandations pour de Nouveaux programmes d’hélicoptères militaires européens”, 2023

Avis n° 18 sur “Opérations collaboratives de combat aérien et spatial en Europe”, 2023

Avis n° 19 sur “Exploration spatiale : maintenir l’élan”, 2024



Avis de l'AAE sur

# Vers un transport aérien décarbonné

# Avis

ACADÉMIE DE L'AIR ET DE L'ESPACE

Ancien observatoire de Jolimont

1 avenue Camille Flammarion

31500 Toulouse – France

[contact@academieairespace.com](mailto:contact@academieairespace.com)

Tél : +33 (0)5 32 66 97 96

[www.academieairespace.com](http://www.academieairespace.com)

# Les

Avis n° 20

Février 2024