

Sept  
2022

  
HORIZONS

# Elaboration de scénarios de transition écologique du secteur aérien

---

---

**ANNEXES AU  
RAPPORT FINAL**

# SOMMAIRE

---

<b>SOMMAIRE</b> .....	<b>2</b>
<b>ANNEXE 1 – COMMENTAIRES SUR LES ANNONCES DU SECTEUR RELATIVES A SES EMISSIONS DE CO<sub>2</sub></b> .....	<b>3</b>
<b>ANNEXE 2 – FICHES SCENARIOS</b> .....	<b>5</b>
1. Waypoint 2050 - ATAG – 2020 [13] .....	5
2. Environmental Trends in Aviation to 2050 – OACI – 2019 [187].....	9
3. Energy Technology Perspectives 2020 – IEA – 2020 [188].....	12
4. Zero Climate Impact international aviation pathway towards 2050 - ICSA – 2019 [175].....	15
5. Commercial Market Outlook – 2020-2039 – Boeing – 2020 [189] .....	17
6. Global Market Forecast – Cities, Airports & Aircraft – 2019-2038 – Airbus – 2019 [190].....	18
7. The global scale, distribution and growth of aviation: Implications for climate change - Gössling et Humpe – 2020 [45] .....	20
8. Framework Development for Performance Evaluation of the Future National Airspace System – Hassan et al. – 2015 [191].....	21
9. Carbon road-map : a path to net zero – Sustainable Aviation UK – 2020 [192].....	23
10. Net Zero Technical Report – Committee on Climate Change – 2019 [193] .....	25
11. Transport aérien 2050 : Des recherches pour préparer l’avenir – ONERA - 2010 [194] .....	27
12. Flying in 2050 – Académie de l’Air et de l’Espace – 2013 [195].....	31
13. Destination 2050 – A4E, ACI Europe, ASD, ERA, et CANSO – 2021 [196].....	34
14. Roadmap to decarbonising European aviation – Transport & Environment – 2018 [167] .....	37
15. Pouvoir voler en 2050 : Quelle aviation dans un monde contraint ? – Supaero Decarbo et Shift Project– 2021 [16].....	39
16. Autres scénarios étudiés mais non inclus dans la synthèse finale .....	42
<b>ANNEXE 3 – FICHES LEVIERS</b> .....	<b>45</b>
Introduction .....	45
Fiche 1 : Diminution de la quantité de transport aérien.....	46
Fiche 2 : Augmentation du prix du transport aérien.....	49
Fiche 3 : Intermodalité et modes de transport alternatifs.....	51
Fiche 4 : Efficacité énergétique et renouvellement des flottes .....	54
Fiche 5 : Amélioration des opérations .....	56
Fiche 6 : Carburants Aériens Durables.....	58
Fiche 7 : Hydrogène et électricité bas-carbone .....	61
<b>ANNEXE 4 – HYPOTHESES DETAILLEES DES SCENARIOS</b> .....	<b>64</b>
<b>ANNEXE 5 – RESULTATS DETAILLES DE LA HIERARCHISATION DES ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX LIES AU SECTEUR AERIEN</b> .....	<b>67</b>
<b>SIGLES ET ACRONYMES</b> .....	<b>71</b>

## ANNEXE 1 – COMMENTAIRES SUR LES ANNONCES DU SECTEUR RELATIVES A SES EMISSIONS DE CO<sub>2</sub>

---

Les organismes internationaux du secteur aérien se sont prononcés en prenant des engagements relatifs à la réduction des émissions de GES dont l'ambition est généralement revue à la hausse lors de leurs révisions successives. Ces engagements sont les suivants :

- **« Stabilisation »** des émissions post-2020 au niveau de 2020 (ATAG) ou encore **« croissance neutre en carbone »** à partir de 2020<sup>1</sup> (OACI) [20] [21];
- Réduction de -50% des **émissions nettes** de CO<sub>2</sub> d'ici 2050 par rapport au 2005 (ATAG – cet objectif étant un objectif indicatif (ou « inspirationnal goal ») [20] ;
- **Zéro émissions nettes** en 2050 (IATA) [13].

Ces engagements actuels sont en cours de révision afin de définir des objectifs communs au secteur (Long Term Aspirational Goals ou LTAG). Ces différents objectifs doivent être adoptés lors de la 41<sup>ème</sup> assemblée de l'OACI à l'automne 2022 et devront notamment comporter un volet environnemental comprenant des objectifs ambitieux pour l'aviation internationale, objectifs compatibles avec les Accords de Paris.

C'est dans ce contexte que le Sommet de l'Aviation a été organisé en février 2022 à Toulouse, en présence des ministres des transports des 27 États membres de l'Union européenne, du commissaire européen aux transports, du président du Conseil de l'OACI, des directeurs généraux européens de l'aviation civile ainsi que des représentants de l'industrie aéronautique et les représentants d'autres pays (Etats-Unis, Japon, Canada...). Ce sommet a abouti à la déclaration de Toulouse, qui appelle à **l'adoption par l'OACI d'un objectif d'atteinte de la neutralité carbone du secteur à horizon 2050** [20].

Le secteur aérien a pris ou pourrait donc prendre des engagements climatiques internationaux qui mobilisent les notions d'« émissions nettes », de « croissance neutre en carbone » et de « neutralité carbone du secteur » sur lesquelles il est nécessaire de revenir afin de mieux comprendre la portée de ces engagements.

Pour le GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), la **« neutralité carbone » ou « zéro émissions nettes de CO<sub>2</sub> » est « l'état dans lequel toute émission anthropique résiduelle de CO<sub>2</sub> est contrebalancée par des éliminations anthropiques de CO<sub>2</sub> à l'échelle mondiale »** [236].

Ces éliminations anthropiques correspondent aux absorptions de carbone liées aux écosystèmes anthropiques (c'est-à-dire les milieux naturels gérés par l'homme : forêt, sols agricoles...) et certains procédés industriels (capture et stockage ou réutilisation du carbone) comme le rappelle le Ministère français de la Transition Ecologique.

La définition du GIEC permet ainsi de définir le concept « d'émissions nettes de CO<sub>2</sub> ». Il s'agit des émissions anthropiques de CO<sub>2</sub> (dites émissions « brutes ») auxquelles sont retranchées les absorptions anthropiques de CO<sub>2</sub>. Une croissance « neutre en carbone » du secteur aérien serait donc une situation où celui-ci verrait son activité augmenter tout en maintenant (ou « stabilisant ») ses émissions nettes de CO<sub>2</sub>.

Par conséquent, **le secteur aérien ne s'est donc pas aujourd'hui engagé à diminuer ses émissions brutes de CO<sub>2</sub>** (en dehors de l'objectif indicatif adopté par l'ATAG de « réduction de -50 % des émissions nettes de CO<sub>2</sub> d'ici 2050 par rapport au 2005 »), mais plutôt à :

- Contrebalancer chaque émission supplémentaire de CO<sub>2</sub> par rapport à 2019 (OACI) ou à 2020 (ATAG) par des éliminations de CO<sub>2</sub> ;
- Contrebalancer chaque émission de CO<sub>2</sub> en 2050 par des éliminations de CO<sub>2</sub> (IATA) pour atteindre la « neutralité carbone ».

**Pour atteindre son objectif, l'OACI a mis en place le mécanisme de « compensation » CORSIA.** Le principe de fonctionnement de ce mécanisme est le suivant : à partir de 2019, l'ensemble des Etats membres de l'OACI doivent réaliser un compte-rendu et une vérification des émissions de CO<sub>2</sub> sur les vols internationaux. Chaque année, les Etats calculent pour les opérateurs qui dépendent d'eux les exigences de compensation, qui sont calculées en déduisant des émissions brutes de l'année en question celles de l'année 2019 ainsi que « les avantages liés à l'utilisation de carburants alternatifs ». Après avoir reçu le

---

<sup>1</sup> A noter qu'en raison de la pandémie de COVID-19 qui a fortement réduit le trafic aérien mondial, les émissions utilisées comme référence par l'OACI sont finalement celles de 2019 et non celles de 2020.

montant final d'émission à compenser, l'exploitant doit acheter puis annuler des unités d'émissions par des projets éligibles de compensation carbone [144].

**La compensation carbone repose sur le financement d'un projet de séquestration ou d'évitement d'un volume d'émissions de CO<sub>2</sub> équivalent à celui à contrebalancer.** Il s'agit aujourd'hui le plus souvent de projets de reboisement ou d'agroforesterie. Cependant, la compensation d'émissions de CO<sub>2</sub> par le financement de projets de séquestration (qui sont généralement les projets proposés) est confrontée aux limites de temporalité (les émissions sont instantanées alors que les absorptions de GES peuvent être progressives), de non permanence (il est impossible de garantir la pérennité de certains projets de séquestration), d'équivalence (les bénéfices des projets de séquestration ne compensent pas exactement les dommages dus aux émissions compensées) et de mesure (la communauté scientifique sait aujourd'hui beaucoup moins bien mesurer les absorptions que les émissions de gaz à effet de serre) [211] [212] [213].

D'autres controverses sur la compensation existent également, comme celles sur le prix du carbone, de la réelle additionnalité des projets de compensation, de la distinction entre les projets de réduction des émissions et de ceux de séquestration. En particulier, certains projets de compensation de type « plantations industrielles » peuvent avoir des impacts négatifs sur l'environnement [237].

**Les engagements de l'OACI et de l'ATAG reviennent donc à contrebalancer des émissions certaines** (permanentes et dont le montant est connu) **et instantanées de CO<sub>2</sub> par des absorptions incertaines** (non permanentes et d'un montant incertain) **et progressives dans le temps. Ils ne permettent donc pas de contrebalancer exactement les dommages causés par les émissions du CO<sub>2</sub> liées à l'activité du secteur.** Cela pose problème, puisque pour respecter l'Accord de Paris, il est prioritaire de réduire drastiquement ses émissions de gaz à effet de serre [237].

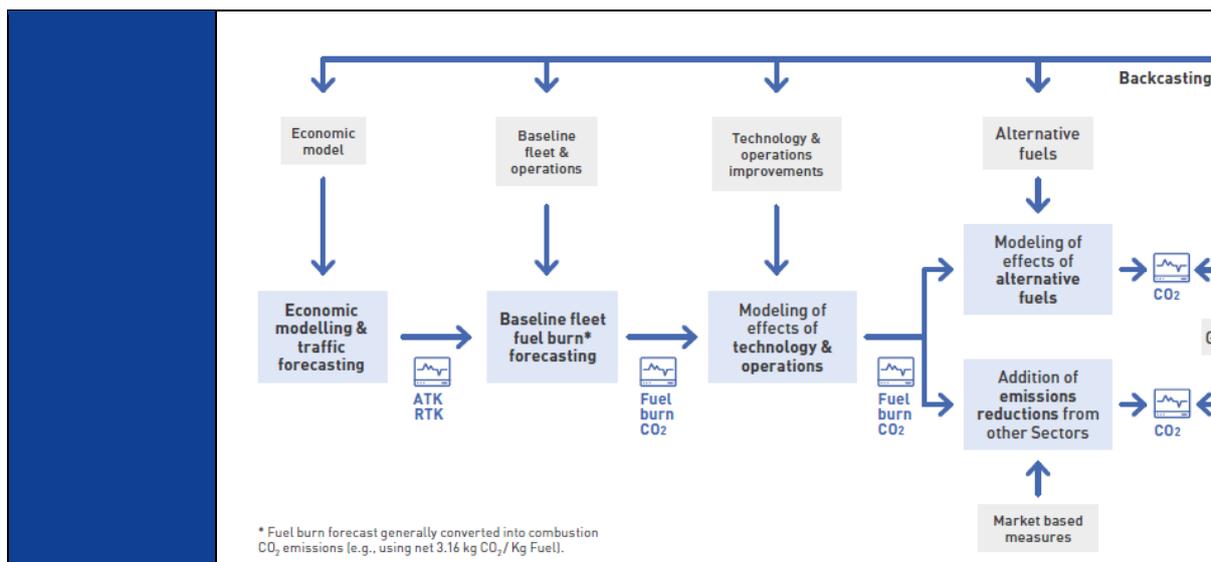
**L'engagement de l'IATA d'atteinte de la neutralité carbone pour le secteur aérien en 2050 est quant à lui controversé.** En effet, l'ADEME rappelle qu'individuellement ou à leur échelle, les acteurs économiques ne sont, ni ne peuvent devenir, ou se revendiquer, « neutres en carbone » puisque l'atteinte d'une neutralité carbone arithmétique à leur échelle n'a pas de sens. Cette notion n'est valable qu'à l'échelle planétaire [237].

## ANNEXE 2 – FICHES SCENARIOS

Les fiches présentes dans cette annexe ont été élaborées entre février et avril 2021. Elles constituent ainsi un résumé des principaux scénarios de transition du secteur aérien à cette période. A noter que certains scénarios et certains engagements du secteur aérien ont été revus depuis.

### 1. Waypoint 2050 - ATAG – 2020 [13]

Ambition du scénario	
L'ATAG (Air Transport Action Group) étudie s'il est possible d'atteindre la neutralité carbone pour le secteur de l'aviation commerciale à l'horizon 2050 en construisant plusieurs scénarios de prospective mobilisant quatre leviers de manière plus ou moins importante.	
Caractéristiques principales	
Nature du développeur	Organisme international
Modèle utilisé	Pas de précision
Approche analytique	<p>Pour prévoir les émissions de GES, l'ATAG a créé son propre modèle qu'elle interface avec un autre modèle développé par le Centre aérospatial allemand (DLR) qui lui permet d'estimer l'impact d'un changement technologique sur les consommations de carburant de la flotte mondiale d'avions. Elle mobilise pour ce faire les données issues du Cirium Fleet Analyzer sur la composition de la flotte mondiale actuelle ainsi que les modèles de renouvellement des flottes développés par l'Organisation de l'Aviation Civile Internationale (OACI).</p> <p>Le modèle de l'ATAG est composé de plusieurs modules comme expliqué dans la figure ci-dessous. Le module économique permet d'obtenir des prévisions de trafic qui sont utilisées dans un second module qui permet de générer des prévisions mondiales des consommations de carburants en utilisant également une modélisation de la flotte aérienne mondiale et des procédures dans les aéroports. Le modèle étudie alors l'impact de trois leviers sur les consommations :</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Les améliorations technologiques (amélioration de l'efficacité énergétique des avions, électrification / décarbonation des appareils...);</li><li>• Les leviers opérationnels (optimisation des trajectoires de vols, décarbonation des opérations au sol, SETI/SETO, substitution des APU par des groupes électriques...);</li><li>• Le recours à des Carburants Aériens Durables (CAD - comme des biocarburants ou des carburants de synthèse durables) plus ou moins décarbonés.</li></ul> <p>Le modèle calcule dans le même temps les capacités de productions de CAD et l'impact de celle-ci sur les écosystèmes et les capacités mondiales de production d'eau et de nourriture afin de contrôler la durabilité de ce dernier levier et contrôler les concurrences d'usages. Il calcule enfin la nécessité de recourir à des mesures supplémentaires (comme la compensation) pour décarboner complètement le secteur de l'aviation à l'horizon 2050.</p>



Horizon et pas temporel	L'ATAG utilise un modèle pas à pas qui calcule les émissions de GES de manière annuelle en modélisant pour chaque année la composition de la flotte aérienne mondiale, le mix énergétique utilisé et l'efficacité des procédures mises en place dans les aéroports entre 2019 et 2050.
Périmètre géographique	Monde
Types de vols étudiés	Avion commerciale
Impacts analysés	CO <sub>2</sub>

### Hypothèses du scénario

L'ATAG utilise 4 jeux d'hypothèses différents pour modéliser 4 scénarios de transition carbone possibles pour le secteur de l'aérien à l'horizon 2050 (voir tableau ci-dessous). Ces scénarios partagent tous un certain nombre d'hypothèses, notamment celles d'une croissance moyenne de la demande de trafic de 3 % par an en moyenne entre 2019 et 2050 et une décarbonation importante (entre 70 et 100%) des CAD.

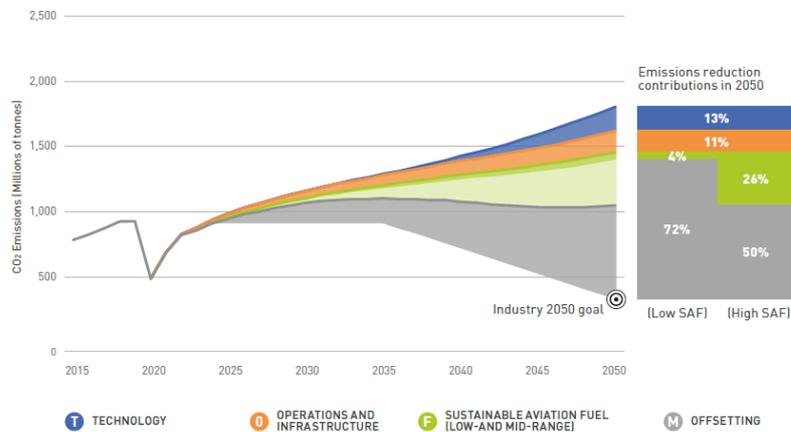
	S0 : BAU	S1 : Améliorations techno. et opérationnelles	S2 : Recours massif aux CAD	S3 : Développement techno. agressif
Dévelop. Techno.	Faible (rythme actuel)	Fort (électrification et hybridation)	Moyen (amélioration de l'efficacité éner.)	Très fort (électrification et hybridation poussées)
Amélioration des opérations	Moyenne	Haute	Moyenne	Moyenne
Volume de CAD en 2050 (Mt)	20-144	290-390	350-450	235-340
Recours à la compensation	Oui (recours majeur)	Non (si nécessaire)	Non (si nécessaire)	Non (si nécessaire)

### Principaux résultats

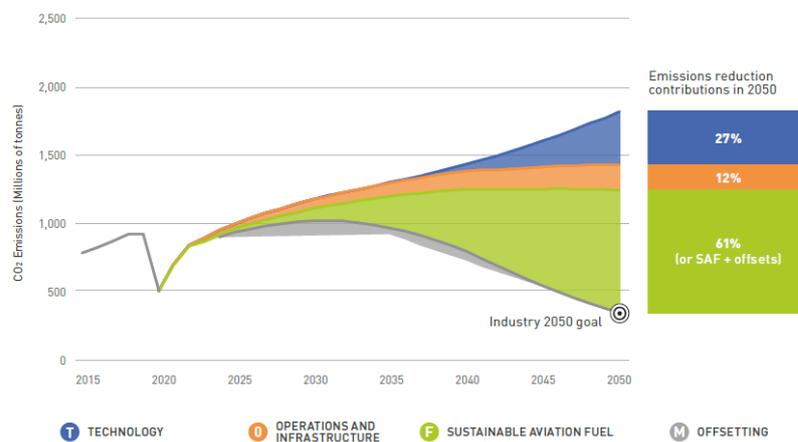
- Il est possible pour le secteur aérien d'atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050 (plutôt vers 2060-2070) sans recourir massivement à la compensation ;
- Il existe plusieurs voies pour le faire, mais l'atteinte de la neutralité carbone nécessite toujours une amélioration plus ou moins importante de l'efficacité énergétique des avions et des opérations ainsi qu'un recours plus ou moins poussé aux CAD ;

- Chacune de ces voies nécessite pour être réalisées des investissements et efforts colossaux (« enormous ») ;
- La production massive de CAD est compatible avec les autres usages des terres (notamment l'agriculture).

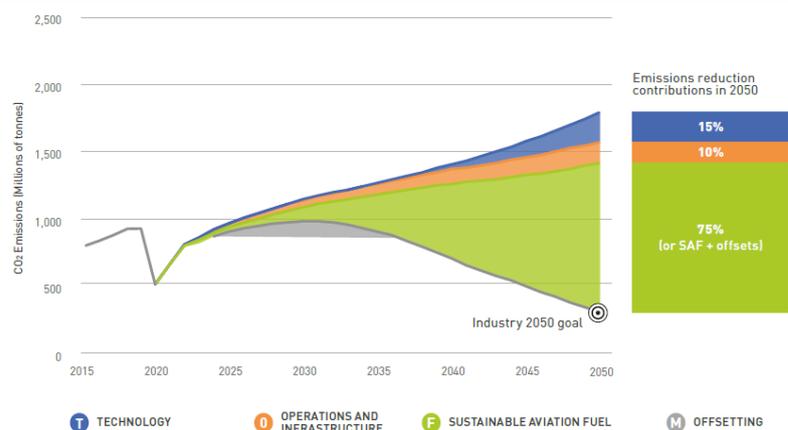
### Scénario 0 : Business-as-usual



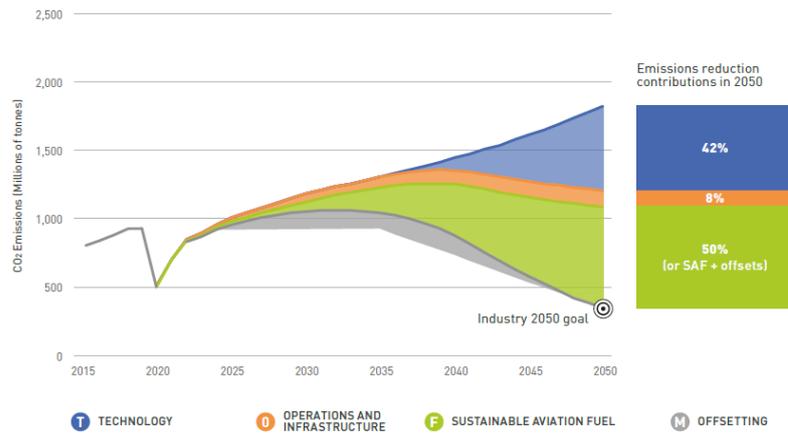
### Scénario 1 : Améliorations technologiques et opérationnelles



### Scénario 2 : Recours massif aux CAD



### Scénario 3 : Développement technologique agressif



## 2. Environmental Trends in Aviation to 2050 – OACI – 2019 [187]

Ambition du scénario	
Le rapport de l'Organisation de l'Aviation Civile Internationale (OACI) prévoit l'évolution des émissions de GES, de NOx et du bruit générés par l'aviation commerciale entre 2015 et 2050, et étudie s'il est possible d'atteindre les objectifs de l'OACI (croissance neutre en carbone des vols à partir de 2020, amélioration de l'efficacité énergétique des avions de 2 % par an en moyenne entre 2015 et 2050) notamment grâce à des améliorations technologiques et des opérations et à un recours massif aux Carburants Aériens Durables (CAD).	
Caractéristiques principales	
Nature du développeur	Organisme international
Modèle utilisé	<p>Les prévisions d'impacts en termes d'émissions de CO<sub>2</sub>, de NOx et de bruits reposent sur l'utilisation :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Des prévisions : <ul style="list-style-type: none"> <li>○ De la demande de transport aérien (CAEP) ;</li> <li>○ De trafic à long terme de l'OACI (passagers et fret) ;</li> <li>○ Pour les jets d'affaires (CAEP) ;</li> <li>○ De la production, de la consommation et de l'impact de CAD.</li> </ul> </li> <li>• De 3 modèles pour prévoir les émissions et consommations de carburant : <ul style="list-style-type: none"> <li>○ US Federal Aviation Administration's (FAA) Aviation Environmental Design Tool (AEDT) ;</li> <li>○ EUROCONTROL's IMPACT ;</li> <li>○ Manchester Metropolitan University's Future Civil Aviation Scenario Software Tool (FAST).</li> </ul> </li> <li>• De 3 modèles pour prévoir les impacts en termes de bruit : <ul style="list-style-type: none"> <li>○ US FAA's AEDT ;</li> <li>○ EC / EASA / EUROCONTROL's SysTem for AirPort noise Exposure Studies (STAPES) ;</li> <li>○ UK Civil Aviation Authority's (CAA) Aircraft Noise Contour Model (ANCON).</li> </ul> </li> </ul>
Approche analytique	<p>Les auteurs se basent sur des prévisions de trafic pour produire des estimations de consommations de carburant, à partir desquelles ils déduisent des prévisions d'émissions de CO<sub>2</sub> et de NOx en jouant sur 4 variables :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• L'amélioration de l'efficacité énergétique des nouveaux appareils ;</li> <li>• L'amélioration des opérations (comme l'amélioration de l'ATM et de l'utilisation des infrastructures) ;</li> <li>• Les capacités mondiales de production de CAD ;</li> <li>• L'amélioration des moteurs par rapport aux émissions de NOx.</li> </ul> <p>Les auteurs se basent également sur ces prévisions, et sur des hypothèses de croissance de la population et de l'amélioration des opérations par rapport au bruit et à la qualité de l'air pour prévoir l'évolution de ces deux impacts.</p>
Horizon et pas temporel	Les auteurs font des prévisions annuelles entre 2015 et 2045, et extrapolent ces prévisions entre 2045 et 2050.
Périmètre géographique	<p>Monde :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Aviation internationale pour les émissions et les consommations de carburants ;</li> <li>• Aviation internationale et domestique pour le bruit et la qualité de l'air.</li> </ul>
Types de vols étudiés	Avion commerciale
Impacts analysés	CO <sub>2</sub> , NOx, Bruit
Hypothèses du scénario	
Hypothèses du scénario	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Part de l'aviation internationale dans la consommation totale (aviation internationale et domestique) de carburants reste constante à 65 % entre 2015 et 2050 au niveau mondial ;</li> <li>• Pas de nouvelles contraintes sur les infrastructures des aéroports ou de manière opérationnelle dans l'espace aérien ;</li> <li>• Combustion d'un litre de carburant entraîne l'émissions de 3,16 kg de CO<sub>2</sub> (chiffre inconnu pour les NOx) ;</li> </ul>

- Evolutions inconnues des demandes de trafic (données d'entrée du modèle);
- L'amélioration de l'efficacité énergétique des avions la plus optimiste s'élève à 1,37% par an en moyenne entre 2015 et 2050, avec une hausse modérée entre 2015 et 2025 et une accélération entre 2025 et 2035;
- Peu ou pas de conflits d'usages sur les CAD avec d'autres secteurs;
- Amélioration de la performance des moteurs en termes de bruit et évolution de la population aux alentours des aéroports;
- Pas d'amélioration technologique des moteurs en termes d'émissions de PM, mais amélioration des procédures dans les aéroports.

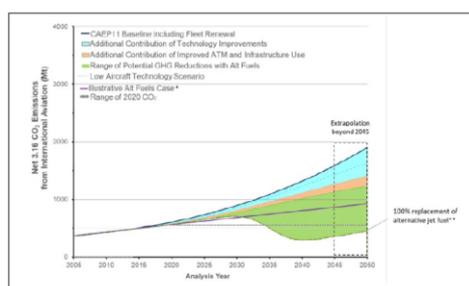
## Principaux résultats

### Demande en carburants

- Croissance de 4,3 % par an de la demande en aviation commerciale (en TKT) entre 2015 et 2035;
- Il est peu probable que l'objectif actuel d'amélioration de l'efficacité énergétique de l'OACI (+2 % par an en moyenne entre 2015 et 2050) puisse être atteint.

### Emissions de CO<sub>2</sub> liées aux vols internationaux

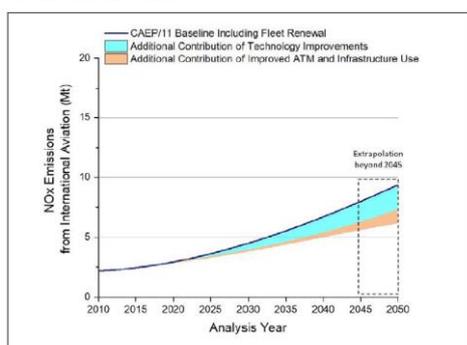
**FIGURE 5:** Net CO<sub>2</sub> Emissions from International Aviation, 2005 to 2050, Including Alternative Fuels Life Cycle CO<sub>2</sub> Emissions Reductions (Based on 3.16 kg of CO<sub>2</sub> per 1 kg of fuel burn)



- Les émissions de CO<sub>2</sub> liées aux vols internationaux seront multipliées entre 2,4 et 3,8 fois entre 2015 et 2050 sans utilisation de CAD;
- Il est sans doute possible de produire suffisamment de CAD pour couvrir tous les besoins du secteur en 2050, au prix d'efforts financiers considérables;
- Pour assurer la neutralité carbone de la croissance de l'activité post 2020 (objectif OACI), il est nécessaire de remplacer complètement les carburants actuels par des CAD, et d'améliorer de manière très importante l'efficacité énergétique des avions;
- L'objectif d'assurer la neutralité de la croissance dès 2020 ne sera probablement pas atteint.

### Emissions de NO<sub>x</sub> liées aux vols internationaux

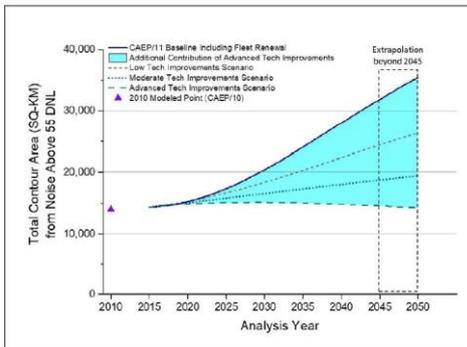
**FIGURE 6:** Full-Flight NO<sub>x</sub> Emissions from International Aviation, 2010 to 2050



- Un taux d'utilisation de 100 % de CAD entraîne une baisse de 63 % des émissions de NO<sub>x</sub> liées aux vols internationaux en 2050.

## Bruits

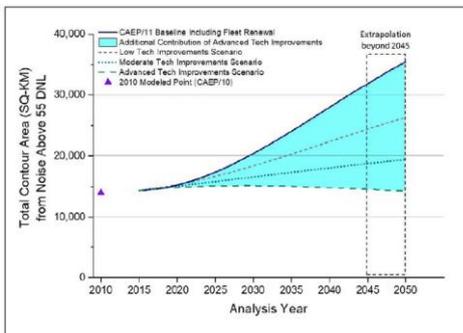
**FIGURE 7:** Total Aircraft Noise Contour Area Above 55 dB DNL for 315 Airports (km<sup>2</sup>), 2010 to 2050



- Multiplication entre 1,0 et 2,2 fois de la surface où habite une population située à l'intérieur des contours de 55 dB du niveau moyen annuel jour-nuit de 315 aéroports représentant 80 % du trafic mondial entre 2010 et 2045.

## Qualité de l'air

**FIGURE 8:** NOx Emissions below 3,000 Feet - International Aviation, 2010 to 2050.



- Les émissions de NOx en dessous de 3000 pieds passent de 0,18 Mt en 2015 à 0,44-0,80 Mt en 2045 ;
- Les émissions de particules passeront de 1243 t en 2015 à 3230-3572 t en 2045.

### 3. Energy Technology Perspectives 2020 – IEA – 2020 [188]

Ambition du scénario	
L'Agence internationale de l'Energy (IEA) a développé un scénario de prospective d'évolution du mix énergétique nommé « Sustainable Development Scenario » qui est compatible avec les Objectifs de Développement Durable de l'Organisation des Nations Unies et l'Accord de Paris. Dans celui-ci, les émissions de gaz à effet de serre atteignent rapidement un plafond avant de baisser rapidement et de manière importante. La neutralité carbone est atteinte au niveau mondial en 2070, notamment grâce au recours à des technologies de capture et de stockage du carbone.	
Caractéristiques principales	
Nature du développeur	Organisme international.
Modèle utilisé	L'IEA utilise le modèle AIM (Aviation Integrated Model) développé par University College London Energy Institute. Celui-ci est un modèle « <i>global des systèmes d'aviation qui simule les interactions entre les passagers, les compagnies aériennes, les aéroports et d'autres acteurs du système à l'avenir, dans le but de donner un aperçu de la manière dont les leviers politiques et les autres changements de système prévus affecteront les externalités et les impacts économiques de l'aviation</i> » <sup>2</sup> .
Approche analytique	L'IEA fixe dans son scénario SDS un certain nombre d'objectifs à respecter, puis élabore des projections mondiales de développement des énergies propres grâce à son modèle ETP (Energy Technology Perspectives) qui recouvre les secteurs de la production d'énergie (production et transformation) ainsi que les consommations d'énergie dans les secteurs des transports, du bâtiment et de l'industrie. L'IEA étudie enfin les mesures à mettre en place pour effectuer cette transition énergétique et les impacts de celle-ci, en particulier dans le secteur de l'aviation.
Horizon et pas temporel	L'IEA fait des projections d'évolution des émissions de CO <sub>2</sub> entre 2019 et 2070.
Périmètre géographique	Monde.
Types de vols étudiés	Avion commerciale
Impacts analysés	CO <sub>2</sub>
Hypothèses du scénario	
Hypothèses du scénario	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Retour de la demande en PKT au niveau de 2019 en 2022 ;</li> <li>• Politiques gouvernementales strictes, notamment des mesures qui augmentent le coût global du transport aérien (prix de de la tonne de CO<sub>2</sub> en 2050 : 150 USD) et encourage le développement des Carburants aériens durables (CAD) et de technologies permettant d'améliorer l'efficacité énergétique des appareils ;</li> <li>• Reconversion des anciens appareils de transports de passagers en avions cargo ;</li> <li>• Amélioration des opérations ;</li> <li>• Amélioration de l'efficacité énergétique des avions de 2,2 % par an entre 2019 et 2030 (énergie par PKT) ;</li> <li>• Modernisation accélérée de la flotte du fait de la crise sanitaire du COVID-19 ;</li> <li>• Promotion de modes de transport alternatifs à l'avion (trains) ;</li> <li>• Pas d'intégration de politiques de promotion des visioconférences ;</li> <li>• Pas d'électrification de la flotte avant 2070.</li> </ul>

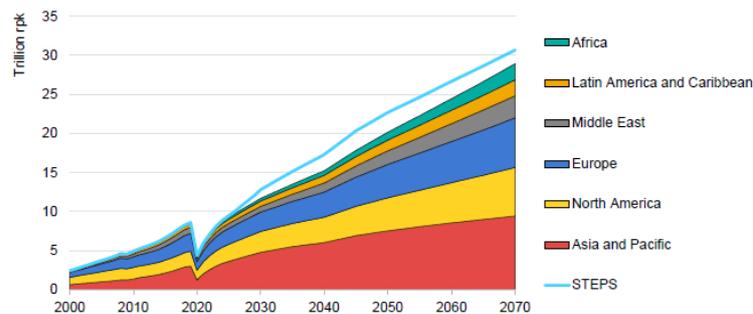
<sup>2</sup> AIM2015 : Documentation. Air Transportation Systems Lab, UCL Energy Institute. 2020.

## Principaux résultats

### Une demande en forte croissance

- Augmentation de 350 % de la demande entre 2019 et 2070 ;
- Baisse de 12 % de la demande en 2040 par rapport au scénario SP, 10 % en 2070 ;
- Croissance de la demande principalement en Asie (un tiers de la croissance) ;
- L'Europe et l'Amérique du Nord concentrent toutes les deux un cinquième de la croissance de la demande ;
- Croissance la plus rapide en Afrique (Croissance annuelle moyenne de 6 %) ;
- Croissance de 2 % par an de la demande de transport de fret.

Figure 5.14 Passenger aviation activity by region in the Sustainable Development Scenario, 2019-70



IEA 2020. All rights reserved.

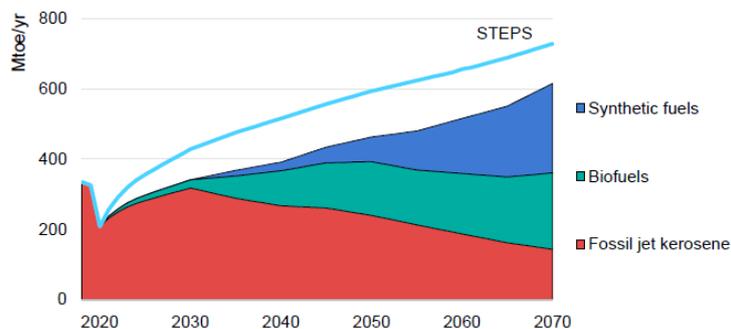
Notes: rpk = revenue passenger-kilometre; STEPS = Stated Policies Scenario. Not including unscheduled or private flights. The projections were developed using the Aviation Integrated Model developed by University College London Energy Institute (AIM, 2020).

Despite strong policy measures, including taxes that reduce overall demand, air passenger traffic increases by about 350% through to 2070 in the Sustainable Development Scenario.

### Le remplacement progressif et partiel du kérozène par des CAD

- 25 % de biocarburants en 2040, et 35 % en 2070 ;
- Plus de 40 % de carburants de synthèse durables en 2070.

Figure 5.15 Global aviation fuel consumption in the Sustainable Development Scenario and total fuel use in the Stated Policies Scenario, 2019-70

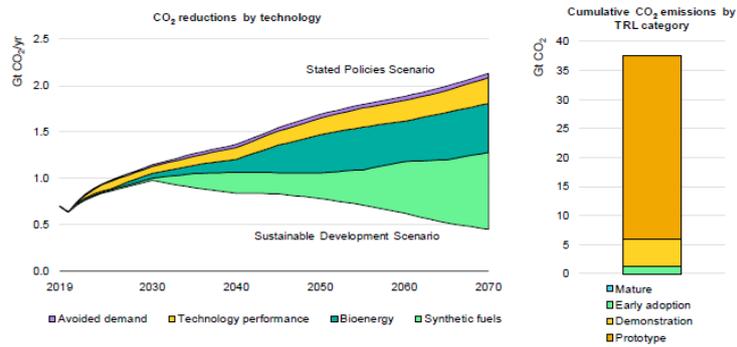


IEA 2020. All rights reserved.

Notes: STEPS = Stated Policies Scenario. Projections developed using the Aviation Integrated Model developed by University College London Energy Institute (AIM, 2020).

Rigorous policies to promote the development and adoption of sustainable aviation fuels play the leading role in reducing the climate impacts of aviation in the Sustainable Development Scenario.

Figure 5.16 Global CO<sub>2</sub> emissions in aviation by abatement measure (left) and technology readiness level (right) in the Sustainable Development Scenario relative to the Stated Policies Scenario



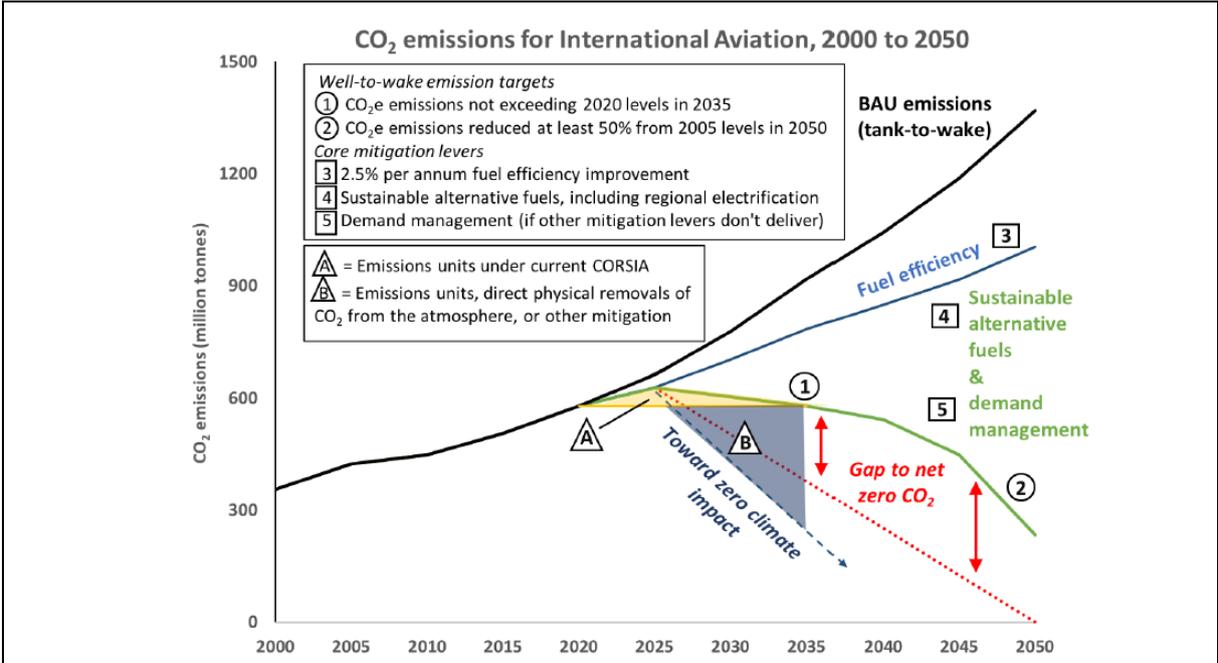
IEA 2020. All rights reserved.

Notes: The projections were developed using the Aviation Integrated Model developed by University College London Energy Institute (AIM, 2020). TRL = technology readiness level. See Box 2.6 in Chapter 2 for the definition of the maturity categories: large prototype, demonstration, early adoption and mature.

**Rigorous policies that promote sustainable aviation fuels, efficiency and shifts to alternative transport modes reduce emissions substantially in the Sustainable Development Scenario.**

#### 4. Zero Climate Impact international aviation pathway towards 2050 - ICSA – 2019 [175]

Ambition du scénario	
L'ICSA (la Coalition internationale pour l'aviation durable) propose dans son scénario un certain nombre de mesures à mettre en place par les industriels du secteur de l'aviation, les compagnies aériennes, les gestionnaires d'aéroports ainsi que les autres acteurs du secteur et les gouvernements nationaux et sous-nationaux pour diminuer les émissions de l'aviation internationale afin que ce secteur soit aligné avec l'objectif de l'Accord de Paris de limiter la hausse des températures à 1,5°C par rapport aux niveaux préindustriels.	
Caractéristiques principales	
Nature du développeur	Organisme international
Modèle utilisé	Non précisé
Approche analytique	Non précisé
Horizon et pas temporel	2020 à 2050
Périmètre géographique	Monde
Types de vols étudiés	Avion commerciale
Impacts analysés	CO <sub>2</sub>
Hypothèses du scénario	
Hypothèses du scénario	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Croissance du trafic de 2,9% par an entre 2015 et 2050 ;</li> <li>• Deux objectifs à ne pas dépasser : <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Les émissions de <b>GES</b> en 2035 ne doivent pas dépasser le niveau qu'elles avaient en 2020 ;</li> <li>○ Les émissions de <b>GES</b> du puits au sillage (« well-to-wake ») en 2050 doivent être au moins -50% plus basses qu'en 2005.</li> </ul> </li> </ul>
Principaux résultats	
<p>Pour respecter l'objectif de l'Accord de Paris et les contraintes du scénario, il est nécessaire de :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Améliorer de l'efficacité énergétique des appareils d'au moins 2,5 % par an par des avancées technologiques et l'amélioration des opérations ;</li> <li>• Réduire les émissions des biocarburants et des carburants de synthèse par rapport aux carburants fossiles d'au moins 80 % ;</li> <li>• Electrifier la flotte aérienne mondiale ;</li> <li>• Recourir à des mesures de gestion de la demande (encouragement du report modal, des visioconférences...);</li> <li>• Inclure les impacts de l'aviation qui ne sont pas liés aux émissions de CO<sub>2</sub> dans les accords internationaux et les plans nationaux et sous-nationaux.</li> </ul>	



**Figure 1.** Visualizing ICSA’s Enhanced Climate Mitigation Targets and Levers for International Aviation and a notional path toward “zero climate impact” aviation. The schematic displays ICSA’s Enhanced Climate Mitigation Targets (1-2) and Levers (3-5). (A) represents emissions units that would be claimed under CORSIA if all international aviation emissions were covered, which they are not. Sustainable alternative fuels can also count towards CORSIA obligations, but we’ve chosen to split sustainable alternative fuels from emissions units. (B) represents additional action out to 2035, which could be continued to reach “zero climate impact” aviation.

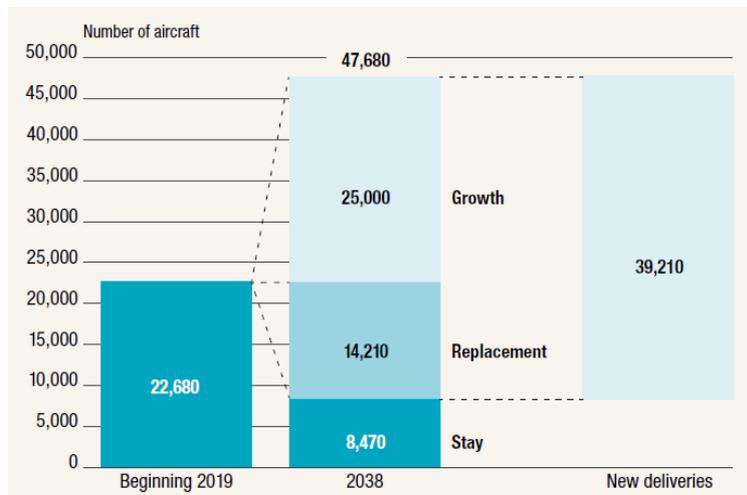
## 5. Commercial Market Outlook – 2020-2039 – Boeing – 2020 [189]

Ambition du scénario	
Le scénario de Boeing établit des projections mondiales de l'évolution de la demande en avions pour le transport de passagers et de fret entre 2020 et 2039, en distinguant les nouveaux appareils de ceux qui seront conservés et de ceux qui seront remplacés.	
Caractéristiques principales	
Nature du développeur	Secteur privé
Modèle utilisé	Boeing utilise son modèle qui déduit les demandes futures en nouveaux appareils et en services (entraînements des pilotes, du personnel de cabine...) à l'horizon 2039 à partir de prévisions de croissance économique et de trafic aérien.
Approche analytique	Non expliquée
Horizon et pas temporel	Boeing fait des prévisions annuelles entre 2020 et 2039.
Périmètre géographique	Monde
Types de vols étudiés	Avion commerciale
Impacts analysés	Aucun
Hypothèses du scénario	
Hypothèses du scénario	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Non détaillées ;</li> <li>• Impact crise COVID-19: Augmentation du taux de renouvellement des flottes.</li> </ul>
Principaux résultats	
Demande en trafic	
<p>Prévisions de la demande en trafic mondiale (Mds de passager-km payants)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hausse de la demande en trafic d'en moyenne 4,0 % par an (3,1% en Europe) ;</li> </ul>
Demande en appareils	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Demande de 43 110 nouveaux appareils entre 2020 et 2039, dont 98% pour le transport de passagers (99 % en Europe) ;</li> <li>• Augmentation de la flotte de +3,2 % en moyenne entre 2020 et 2039 (2,8 % en Europe).</li> <li>• Remplacements : 56 % des livraisons entre 2020 et 2029, et 48 % entre 2030 et 2039.</li> <li>• Multiplication du nombre d'appareils en circulation par 1,9 entre 2020 et 2039 (1,7 pour l'Europe) ;</li> <li>• 17 % des nouveaux appareils seront de grande taille (Widebody) ;</li> <li>• 41 % des nouveaux appareils seront à destination de la région Asie-Pacifique, et 20 % de l'Europe.</li> </ul>	

## 6. Global Market Forecast – Cities, Airports & Aircraft – 2019-2038 – Airbus – 2019 [190]

Ambition du scénario	
Le scénario Airbus Global Market Forecast 2019 (GMF 2019) établit des projections mondiales de l'évolution de la demande en avions pour le transport de passagers et de fret entre 2019 et 2038, en distinguant les nouveaux appareils de ceux qui seront conservés et de ceux qui seront remplacés.	
Caractéristiques principales	
Nature du développeur	Secteur privé
Modèle utilisé	<p>Airbus utilise son modèle qui déduit les demandes futures en nouveaux appareils et en services (entrainements des pilotes, du personnel de cabine...) à l'horizon 2038 à partir :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• D'analyses d'indicateurs clés (conjoncture économique, financière, de la demande en appareils...), de leur évolution et de la demande actuelle en transport aérien (passagers et fret : localisation des aéroports, nombre de vols, routes empruntés...);</li> <li>• De prévisions : <ul style="list-style-type: none"> <li>○ De la demande de transport aérien (volume et distribution);</li> <li>○ Des besoins opérationnels (en vols (départ, arrivée et croisière) et nombre de vols) pour répondre à cette demande (croissance des différentes routes aériennes, détermination du modèle d'avion le mieux adapté à ces routes...);</li> <li>○ Des besoins d'évolution de la flotte actuelle pour répondre à ces besoins (remplacement d'anciens appareils, évolutions technologiques nécessaires...).</li> </ul> </li> </ul> <p>Airbus utilise également des données provenant de l'OACI (Organisation de l'aviation civile internationale), sans donner de précisions sur leur nature ou la manière dont elles sont utilisées.</p>
Approche analytique	L'analyse l'historique du marché permet à Airbus de prévoir tout d'abord les demandes internationales en transport aérien, demandes desquelles sont déduites les besoins opérationnels futurs en trajectoires de vols et en nombre de vols. Airbus déduit ensuite de ces données les prévisions l'évolution de la flotte actuelle, ce qui lui permet de prévoir les demandes futures en nouveaux appareils et en services.
Horizon et pas temporel	Airbus fait des prévisions annuelles entre 2019 et 2038.
Périmètre géographique	Monde.
Types de vols étudiés	Avion commerciale
Impacts analysés	Aucun.
Hypothèses du scénario	
Hypothèses du scénario	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Non disponibles.</li> </ul>
Principaux résultats	
Demande en trafic	
<p>World annual traffic (billion RPAs)</p> <p>Oil Crisis Gulf Crisis Asian Crisis 9/11 SARS Financial Crisis</p> <p>Airbus GMF 2019 4.3% growth p.a.</p> <p>TRAFFIC HAS PROVEN TO BE RESILIENT TO EXTERNAL SHOCKS AND DOUBLES EVERY 15 YEARS</p> <p>Source: OACI, Airbus GMF 2019 IATA, European Passenger Movement</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hausse de la demande mondiale en trafic d'en moyenne 4,3 % par an entre 2018 et 2038 (3,6 % entre 2018 et 2028 et 3,2 % entre 2028 et 2038 pour l'Europe);</li> <li>• Doublement de la demande mondiale en trafic en 15 ans</li> </ul>

## Demande en appareils



- Demande de 39 210 nouveaux appareils entre 2019 et 2038, dont 98 % pour le transport de passagers ;
- Remplacement de 63 % de la flotte de 2019 (70 % pour l'Europe) ;
- Multiplication du nombre d'appareils en circulation par 2,1 entre 2019 et 2038 (1,8 pour l'Europe) ;
- Respectivement 76 %, 14 % et 10 % des nouveaux appareils seront de petite, moyenne et grande taille ;
- 42 % des nouveaux appareils seront à destination de la région Asie-Pacifique, et 19 % de l'Europe.

## 7. The global scale, distribution and growth of aviation: Implications for climate change - Gössling et Humpe – 2020 [45]

Ambition du scénario							
Les auteurs de l'article calculent des prédictions de la demande et de la distribution par région de la demande mondiale de trafic aérien (pour le transport commercial de passagers) à l'horizon 2050, ainsi que les émissions de CO <sub>2</sub> associées à cette demande.							
Caractéristiques principales							
Nature du développeur	Milieu universitaire.						
Modèle utilisé	Pour prévoir l'évolution du trafic aérien commercial de passagers au niveau mondial et des émissions de CO <sub>2</sub> associées à l'horizon 2050, les auteurs utilisent leur propre modèle qui se base sur les projections existantes (celles de Airbus, Boeing, du Conseil international pour les Transports Propres – ICCT et de UN DESA) jusqu'à 2038 et les extrapole jusqu'en 2050.						
Approche analytique	Non détaillée.						
Horizon et pas temporel	Les auteurs modélisent l'évolution de la demande entre 2018 et 2050.						
Périmètre géographique	Monde.						
Types de vols étudiés	Avion commerciale						
Impacts analysés	CO <sub>2</sub>						
Hypothèses du scénario							
Hypothèses du scénario	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gain d'efficacité énergétique des avions de 1% par an en moyenne ;</li> <li>• Consommation de 3,5 litres de carburant pour 100 PKT en 2018 ;</li> <li>• Emission de 0,087 kg de CO<sub>2</sub> par RBK en 2018.</li> </ul>						
Principaux résultats							
Demande de transport aérien commercial de passagers au niveau mondial à l'horizon 2050 et distribution de celle-ci							
Region	Growth rate per year (%)	RPK 2018 (billion)	RPK share 2018 (%)	RPK 2050 (billion)	RPK share 2050 (%)	RPK per capita 2018	RPK per capita 2050
Africa	5.35	157	1.8	833	2.4	123	335
Asia-Pacific	5.45	2,762	32.5	15,092	44.1	648	3,097
CIS	3.50	213	2.5	641	1.9	894	2,522
Europe	3.45	1,934	22.7	5,727	16.7	2,867	8,616
Latin America	5.10	507	6.0	2,493	7.3	790	3,270
Middle-East	5.35	543	6.4	2,877	8.4	3,181	10,789
North America	3.10	2,174	25.6	5,774	16.9	5,967	13,580
Rest of world	4.28	212	2.5	811	2.4	-	-
Average/Total	4.45	8,503	100	34,247	100		
Emissions de CO <sub>2</sub> associées au transport commercial de passagers au niveau mondial à l'horizon 2050							
Region	CO <sub>2</sub> global (Mt, 2018)	CO <sub>2</sub> global (Mt, 2050)	CO <sub>2</sub> per capita (kg, 2018)	CO <sub>2</sub> per capita (kg, 2050)			
Africa	14	53	11	21			
Asia-Pacific	241	956	57	196			
CIS	19	41	78	160			
Europe	169	363	250	546			
Latin America	44	158	69	207			
Middle-East	47	182	278	683			
North America	190	366	521	860			
Rest of world	19	51	n.a.	n.a.			
Average/Total	743	2,169					

## 8. Framework Development for Performance Evaluation of the Future National Airspace System – Hassan et al. – 2015 [191]

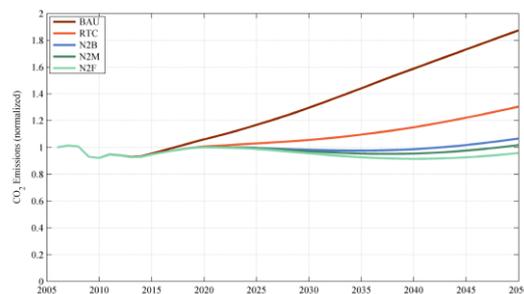
Ambition du scénario	
<p>Les auteurs de l'article étudient si l'amélioration technologique de la flotte aérienne américaine peut permettre d'atteindre les objectifs de 2009 de l'Association internationale du transport aérien (IATA) pour les vols domestiques aux Etats-Unis, à savoir :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• L'amélioration moyenne de l'efficacité en termes de consommations de carburants d'au moins 1,5 % d'ici 2020 ;</li> <li>• La stabilisation des émissions nettes de CO<sub>2</sub> à partir de 2020 pour le secteur aérien (« croissance neutre en carbone », via des mécanismes de marché) ;</li> <li>• La réduction des émissions nettes de CO<sub>2</sub> de 50% entre 2030 et 2050 par rapport à 2005.</li> </ul>	
Caractéristiques principales	
Nature du développeur	Milieu universitaire.
Modèle utilisé	<p>Pour prévoir l'évolution des émissions de CO<sub>2</sub> du secteur aérien américain, le modèle utilise :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Les facteurs d'émissions liés aux consommations de carburant de l'étude du laboratoire Argonne ;</li> <li>• Le modèle développé par Pfaender et al. ainsi que les données de celui-ci pour évaluer les impacts des améliorations technologiques de la flotte aérienne sur les consommations de carburants ;</li> <li>• Un modèle développé à partir des données historiques de consommation de carburants du Bureau of Transportation Statistics (bases de données T-100 et DB1B) pour calculer les consommations de carburants en fonction des modèles d'avions, des temps et des distances de vol ;</li> <li>• Les prévisions de croissance du trafic aérien (annual Terminal Area Forecast et Aerospace Forecast) de l'Administration fédérale de l'aviation (FAA) ;</li> </ul> <p>Le logiciel MATLAB pour effectuer les calculs.</p>
Approche analytique	<p>Les auteurs modélisent l'impact de 5 scénarios d'amélioration technologique de la flotte sur les émissions de CO<sub>2</sub> du secteur aérien américain. Pour chaque scénario, le modèle réalise les opérations suivantes de manière séquentielle entre 2006 et 2050 :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Calcul du réseau opérationnel et de la composition initiale de la flotte aérienne ;</li> <li>• Calcul des prévisions de croissance future des aéroports en termes de trafic ;</li> <li>• Distribution des déplacements pour prévoir les opérations futures le long des itinéraires du réseau ;</li> <li>• Actualisation de la flotte aérienne (remplacement des appareils obsolètes, ajouts d'appareils supplémentaires...);</li> <li>• Calcul des nouvelles consommations de carburants.</li> </ul>
Horizon et pas temporel	Les auteurs modélisent l'évolution annuelle des consommations de carburants et des émissions de CO <sub>2</sub> du secteur aérien américain entre 2015 et 2050.
Périmètre géographique	Etats-Unis.
Types de vols étudiés	Avion commerciale
Impacts analysés	CO <sub>2</sub>
Hypothèses du scénario	
Hypothèses du scénario	<p>Les 5 scénarios d'amélioration technologique de la flotte sont les suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Statu quo(scénario BAU) : les constructeurs ne développent pas de nouveaux modèles d'avions ;</li> <li>• La flotte est améliorée selon les connaissances technologiques actuelles (scénario RTC) ;</li> <li>• Les trois scénarios consistent en l'intégration de plus en plus poussées de développements technologiques aux appareils de la flotte aérienne américaine (scénarios N2B, N2M et N2F).</li> </ul> <p>Certaines hypothèses sont communes aux 5 scénarios étudiés :</p>

- Les appareils ne sont remplacés que par des appareils plus récents et équivalents ou plus performants en termes de capacités de vols, de rentabilité / nombre de places et de consommations de carburants ;
- Les émissions de CO<sub>2</sub> sont proportionnelles aux consommations de carburants ;
- L'impact carbone des biocarburants doit être évalué pour tout leur cycle de vie.

## Principaux résultats

### Projections à l'horizon 2050

- Aucun des scénarios ne permet d'atteindre tous les objectifs de l'IATA ;
- Il est donc nécessaire de recourir à d'autres leviers comme l'amélioration des opérations et la consommation de biocarburants ;
- Les trois scénarios d'intégration d'innovations technologiques permettent de stabiliser les émissions de CO<sub>2</sub> à court terme à des niveaux inférieurs à ceux de 2020, mais les autres leviers sont également nécessaires à long terme pour respecter cet objectif du fait de la hausse du trafic.

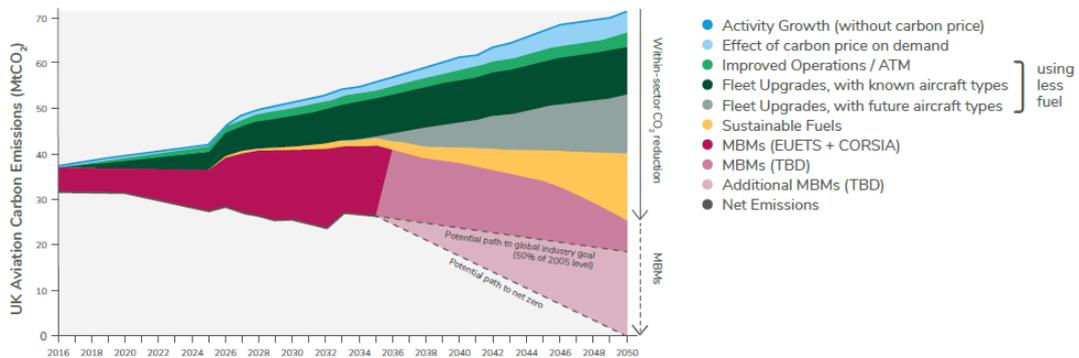


## 9. Carbon road-map : a path to net zero – Sustainable Aviation UK – 2020 [192]

Ambition du scénario	
Ce scénario permet à Sustainable Aviation UK de proposer un scénario de croissance forte de la demande en trafic aérien au Royaume-Uni (ie les vols commerciaux domestiques et internationaux au départ des aéroports britanniques) qui permette d'atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050.	
Caractéristiques principales	
Nature du développeur	Secteur privé.
Modèle utilisé	<p>Sustainable Aviation UK élabore tout d'abord 3 prévisions de la croissance de la demande (en termes de passagers partant des terminaux des aéroports britanniques) en fonction de 3 systèmes différents de tarification du carbone</p> <p>Le consortium étudie ensuite de quelle manière les leviers suivants doivent être mobilisés pour atteindre la neutralité carbone en 2050 :</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Tarification du carbone ;</li> <li>2. Amélioration des opérations ;</li> <li>3. Amélioration de l'efficacité énergétique des appareils (progrès technologique) ;</li> <li>4. Recours à des carburants durables ;</li> <li>5. Recours aux marchés du carbone (compensation, CORSIA...).</li> </ol>
Approche analytique	<p>Sustainable Aviation UK effectue 3 calculs successifs pour établir des prévisions des émissions de CO<sub>2</sub> entre 2016 et 2050 :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Calcul de la croissance de la demande en passagers en fonction du prix du carbone ;</li> <li>• Calcul de la croissance de la demande en PKT ;</li> <li>• Calcul des émissions de CO<sub>2</sub> associées à ces demandes.</li> </ul> <p>Le consortium étudie ensuite dans quelle mesure les leviers 2, 3 et 4 permettent de réduire les émissions en élaborant pour chacun d'entre eux un scénario de mise en œuvre.</p> <p>Il en déduit enfin dans quelle mesure il faudra recourir à des mécanismes de compensation, en distinguant les réductions d'émissions pouvant être atteintes par des mécanismes propres au secteur aérien (notamment de mécanisme CORSIA et le marché UE ETS avant 2035) de celles qui devront venir de mécanismes supplémentaires qui devront être développés (nouveau système de compensation de l'OACI à partir de 2035.)</p>
Horizon et pas temporel	Le modèle permet de calculer de manière annuelle les émissions de CO <sub>2</sub> entre 2016 et 2050.
Périmètre géographique	Royaume-Uni
Types de vols étudiés	Avion commerciale
Impacts analysés	CO <sub>2</sub>
Hypothèses du scénario	
Hypothèses du scénario	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 3 taux de croissance différents de la demande en termes de passagers (de +1,5 % à +1,8 % par an en moyenne entre 2016 et 2050) en fonction des trois systèmes différents de tarification carbone ;</li> <li>• Répartition fixe des émissions de CO<sub>2</sub> entre le transport de passagers (97 %) et le fret (3 %) ;</li> <li>• Les émissions de CO<sub>2</sub> sont proportionnelles à la distance parcourue (en km passagers payants) ;</li> <li>• Electrification de la flotte (introduction des appareils hybrides à partir de 2035 pour les vols domestiques et Européens) ;</li> <li>• Il sera possible de consommer des CAD émettant 100 % de CO<sub>2</sub> de moins que les carburants fossiles tout au long de leur cycle de vie, et ces carburants pourraient représenter 3 2% des carburants consommés par le secteur en 2050.</li> </ul>

## Principaux résultats

**Il est possible de faire croître la demande de 70 % entre 2016 et 2050 tout en atteignant la neutralité carbone**



## Autres résultats

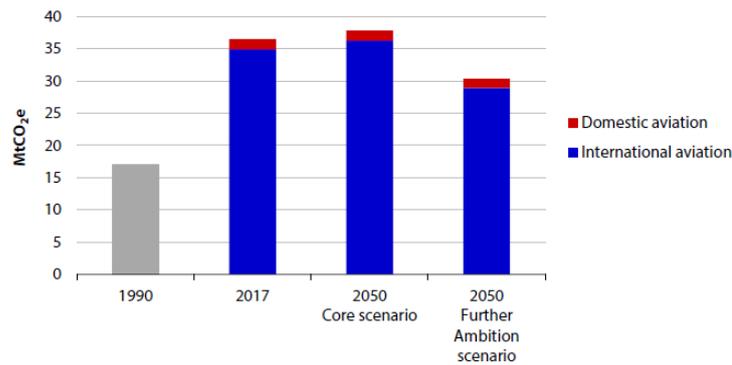
- La mobilisation des leviers ci-dessous permet d'obtenir les réductions suivantes des émissions en 2050 par rapport au scénario de référence :
  - 4 % pour l'amélioration des opérations ;
  - 37 % pour l'amélioration de l'efficacité énergétique des appareils ;
  - 32 % pour des carburants émettant 100 % de CO<sub>2</sub> de moins que les carburants fossiles tout au long de leur cycle de vie.
- Il sera nécessaire de recourir à des mesures de compensation (par exemple en se basant sur le mécanisme CORSIA de l'OACI) pour atteindre la neutralité carbone en 2050.

## 10. Net Zero Technical Report – Committee on Climate Change – 2019 [193]

Ambition du scénario	
<p>Ce rapport du Comité sur le Changement Climatique (CCC) consiste en une série de recommandations adressées au gouvernement du Royaume-Uni et aux différentes administrations pour atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050. Le CCC dresse des recommandations pour chaque secteur, dont celui de l'aviation. Les recommandations apportées sont divisées en trois catégories : les options principales (« core options »), qui sont des options à faibles coûts et faibles regrets (« low-cost low regret »), les options d'ambition plus avancée (« further ambitions ») qui sont plus coûteuses que les premières, et enfin les options spéculatives qui sont encore plus coûteuses, moins acceptables ou plus improbables que les secondes. Le CCC évalue enfin pour chaque option les actions nécessaires à sa mise en œuvre, sa temporalité, son coût, les co-bénéfices et challenges qui lui sont associées et les actions hautement prioritaires à mettre en place pour la réaliser.</p>	
Caractéristiques principales	
Nature du développeur	Organisme gouvernemental
Modèle utilisé	Le modèle utilisé est celui développé par le Département des transports (« Dft's aviation model ») qui établit des prévisions d'évolution de la demande britannique de vols domestiques et internationaux depuis les aéroports du Royaume-Uni.
Approche analytique	Le CCC dresse une liste de mesures permettant de réduire les émissions du secteur aérien à l'horizon 2050. Il les injecte dans le modèle comme hypothèses et étudient leurs impacts avant de sélectionner les ensembles de mesures qui lui semblent le plus pertinent et de déduire les émissions de CO <sub>2</sub> des vols domestiques et internationaux associées à ceux-ci.
Horizon et pas temporel	Les projections des émissions de CO <sub>2</sub> sont à l'horizon 2050.
Périmètre géographique	Royaume-Uni
Types de vols étudiés	Avion commerciale
Impacts analysés	CO <sub>2</sub>
Hypothèses du scénario	
Hypothèses du scénario	<p>Les hypothèses des différents scénarios de réduction des émissions sont les paquets de mesures recommandés par le CCC :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Options principales : <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Limitation de la demande à 60 % au-dessus de son niveau de 2005 ;</li> <li>○ Amélioration de l'efficacité énergétique des avions de 0,9 % par an (grâce à des progrès technologiques et l'amélioration des opérations) ;</li> <li>○ 5 % de biocarburants en 2050.</li> </ul> </li> <li>• Options d'ambition plus avancée : <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Utilisation plus poussée des biocarburants (10 %) ;</li> <li>○ Amélioration plus importante de l'efficacité énergétique (1,4 % par an)</li> <li>○ Electrification de la flotte – premiers appareils hybrides dès 2040 représentant 10 % des passagers-km ;</li> </ul> </li> <li>• Options spéculatives : <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Limitation de la demande à 20-40 % au-dessus de son niveau de 2005 ;</li> <li>○ Utilisation de carburants de synthèse durables.</li> </ul> </li> </ul>

## Principaux résultats

### Emissions associées aux deux premiers paquets de mesures



### Autres résultats

- Les mesures spéculatives permettraient de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> à 22 Mt en 2050 ;
- Il semble qu'il serait rentable de diminuer les émissions de CO<sub>2</sub> du secteur aérien du fait de la réduction des consommations de carburants ;
- Il est nécessaire que le Royaume-Uni participe à rehausser l'ambition internationale en matière de réduction des émissions de l'aviation civile internationale, notamment celle des objectifs climatiques de l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI) ;
- Le Royaume-Uni doit également développer une stratégie de réduction des effets émissions de gaz à effet de serre autres que le CO<sub>2</sub> (NO<sub>x</sub>, traînées de condensations...) du secteur de l'aviation.

## 11. Transport aérien 2050 : Des recherches pour préparer l'avenir – ONERA - 2010 [194]

Ambition du scénario					
L'ONERA propose 4 scénarios de prospective pour le scénario de développement du secteur aérien à l'horizon 2050.					
Caractéristiques principales					
Nature du développeur	Organisme gouvernemental				
Modèle utilisé	Aucun modèle n'est utilisé.				
Approche analytique	L'ONERA développe 4 scénarios prospectifs en définissant 4 contextes mondiaux différents de développement du secteur aérien et en associant à chacun d'entre eux les innovations technologiques et opérationnelles nécessaires pour les réaliser.				
Horizon et pas temporel	Chacun des scénarios propose une vision possible du secteur de l'aérien à l'horizon 2050.				
Périmètre géographique	Monde				
Types de vols étudiés	Avion commerciale, privée et aéroports.				
Impacts analysés	CO <sub>2</sub> , bruit, qualité de l'air, artificialisation des sols.				
Hypothèses du scénario					
Hypothèses du scénario	Nom	UnLimited Skies	Regulatory Push-Pull	Down-to-earth	Fractured world
	Résumé	Un secteur en pleine expansion, régulé par les automatismes	La régulation au bénéfice d'une approche globale du respect de l'environnement	Un monde qui fonctionne quasiment sans énergies fossiles et ne rejette rien	Une juxtaposition de mondes autarciques aux développements très contrastés
	Contexte	<ul style="list-style-type: none"> <li>Pas de contraintes sur la disponibilité de l'énergie</li> <li>Energie fossile de plus en plus chère</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>Arrêt de la consommation d'énergies fossiles et des émissions de polluants</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Echanges très réduits entre blocs géopolitiques très opposés</li> <li>Généralisation de la visioconférence et de la réalité virtuelle pour le tourisme</li> <li>Disparition des vols longs courriers</li> </ul>
	Evolution du trafic	<ul style="list-style-type: none"> <li>Augmentation exponentielle</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Diminution de la demande</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Demande quasiment nulle</li> <li>Trains (à propulsion électrique) = mode de transport privilégié</li> </ul>	

				<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bateaux à voile de très grande dimension pour les transports océaniques</li> <li>• Maintien des vols militaires mais aussi des vols pour les services d'intervention d'urgence (pompiers, police...)</li> </ul>	
Evolution des appareils	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diminution de la masse et optimisation de l'emport : avions de 1000 places</li> <li>• Diminution des traînées</li> <li>• Augmentation de l'efficacité énergétique</li> <li>• Diminution de l'empreinte acoustique</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Avions plus petits</li> <li>• Diminution des traînées</li> <li>• Augmentation de l'efficacité énergétique</li> <li>• Diminution de l'empreinte acoustique</li> </ul>			
Principales innovations pour les appareils	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ailes volantes (Blended Wing Bodies)</li> <li>• Buried engines<sup>3</sup></li> <li>• Propulsion répartie</li> <li>• Allongement infini de l'aile rhomboédrique</li> <li>• Appareils convertibles (décollage / atterrissage vertical)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Renouvellement et électrification massive des flottes<sup>5</sup></li> <li>• Blended Wing Body</li> <li>• Buried engines</li> <li>• Petits réacteurs nucléaires / capteurs solaires / propulsion hybride, pile à combustible régénérative</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Biocarburants durables</li> <li>• Planeurs décollant à l'aide d'un treuil électrique / moto-planeurs électriques</li> <li>• Electrification des vols militaires</li> </ul>		

<sup>3</sup> Moteurs intégrés au fuselage

<sup>5</sup> Permises par le développement de supraconducteurs non conventionnels pouvant fonctionner à des températures relativement élevées par rapport à ceux disponibles aujourd'hui

		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hélices (dont hélices contrarotatives)</li> <li>• Matériaux composites (plus légers)</li> <li>• Amélioration des capacités de stabilisation artificielle</li> <li>• Nouveaux systèmes de soufflage de gouverne</li> <li>• Personal Air Transport<sup>4</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Biocarburants durables</li> <li>• Voilures plus souples</li> <li>• Dispositif de détection des turbulences<sup>6</sup></li> <li>• Calculateurs embarqués</li> <li>• Morphisme<sup>7</sup></li> <li>• Capteurs intelligents mesurant en temps réel l'état de la voilure</li> <li>• PAT / transports en commun aériens</li> <li>• Généralisation des hélices (contrarotatives)</li> </ul>		
	Innovations sur les opérations	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Full automation<sup>8</sup></li> <li>• Disparition des cockpits</li> <li>• Contrat 4D<sup>9</sup></li> <li>• Optimisation des trajectoires en temps réel</li> <li>• Profil de descente moteur au ralenti (permis par full)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Full automation</li> <li>• Contrat 4D</li> <li>• Procédures « vertes »<sup>10</sup></li> <li>• Vols moins rapides</li> <li>• Fractionnement des grands trajets pour limiter la consommation</li> <li>• Option de ravitaillement en vol / mobilisation de</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Free flight</li> <li>• Automatisation des vols</li> </ul>	

<sup>4</sup> Véhicule individuel à décollage et atterrissage très courts ou verticaux

<sup>6</sup> Pour lutter contre l'augmentation de l'exposition à celles-ci (du fait de la diminution de l'altitude moyenne des vols)

<sup>7</sup> Permet des gains en efficacité énergétique du fait du contrôle actif de l'écoulement

<sup>8</sup> Quasi-automatisation du pilotage avec contrôle depuis le sol

<sup>9</sup> Planification précise et négociée des vols entre les compagnies aérienne qui permet dans ce scénario l'optimisation de l'espace aérien dans un contexte d'une forte croissance du trafic. Les compagnies aériens ne choisissent plus leurs trajets et leurs créneaux horaires (système contraire à celui du free flight).

<sup>10</sup> Trajectoires et profils d'approche antibruit, choix d'altitudes permettant de réduire les formations de traînées de condensation...

		automation )	<p>remorqueurs quand cela permet d'économiser du carburant</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Vols moins hauts</li> <li>• Optimisation de la répartition des portes d'embarquement</li> <li>• Traction automatique des avions vers et depuis les seuils des pistes</li> <li>• Assistance au décollage (catapulte, décollages en pente)</li> </ul>		
	Evolution du réseau aéroportuaire	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Développement d'un réseau de structure similaire à la situation actuelle</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Neutralité carbone des aéroports</li> <li>• Moins hub &amp; spokes et davantage de plateformes exploitées en réseau point-à-point, dont certaines sont reliées via une liaison ferroviaire</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Disparition des aéroports</li> <li>• Neutralité carbone des bases aériennes</li> </ul>	
	Compensation		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Des trajets par les passagers</li> <li>• Des aéroports</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Des bases aériennes</li> </ul>	

### Principaux résultats

Cinq technologies/leviers prioritaires à développer :

- Avion électrique ;
- Configurations d'appareils innovants ;
- Propulsion neutre en CO<sub>2</sub>;
- Aérodromes neutres en CO<sub>2</sub>;
- Automatisation complète du secteur aérien.

## 12. Flying in 2050 – Académie de l’Air et de l’Espace – 2013 [195]

Ambition du scénario	
Face aux enjeux du transport aérien, l'Académie de l'Air et de l'Espace (AAE) a demandé à sa Commission de Prospective (CF) de mesurer les risques à l'horizon 2050, et de formuler des recommandations visant à les réduire.	
Caractéristiques principales	
Nature du développeur	Association loi 1901
Modèle utilisé	Non détaillé
Approche analytique	Non détaillé
Horizon et pas temporel	Les projections des émissions de CO <sub>2</sub> sont à l'horizon 2050.
Périmètre géographique	Monde.
Types de vols étudiés	Avion commerciale
Impacts analysés	CO <sub>2</sub>
Hypothèses du scénario	
Hypothèses du scénario	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Le chiffre d'affaires du transport aérien de passagers augmente en proportion fixe du PIB ;</li> <li>• La part de marché du chiffre d'affaires est inversement proportionnelle au carré de la distance ;</li> <li>• Croissance annuelle de 2,8 % du trafic :               <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Triplement du volume de PKT ((x1,2 pour Europe) ;</li> <li>○ Triplement du nombre de passagers (x1,2 pour Europe) ;</li> <li>○ Augmentation légère de la distance moyenne de vol ;</li> <li>○ Doublement du nombre de vols (x1,2 pour Europe) ;</li> <li>○ Augmentation du taux de charge des avions.</li> </ul> </li> <li>• Augmentation de 35 % de l'efficacité énergétique en 2050 par rapport à 2010 (pas de rupture technologique) ;</li> <li>• Doublement de la demande en kérosène ;</li> <li>• Pas d'électricité ou d'hydrogène ;</li> <li>• Amélioration des opérations.</li> </ul>
Principaux résultats	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Les progrès technologiques ne suffiront pas à atteindre les objectifs de l'OACI ;</li> <li>• Il est nécessaire d'investir dans la recherche pour trouver des moyens de réduire les émissions de GES ;</li> <li>• Tension sur les approvisionnements et nécessité de trouver 100 Mt de carburants de substitution (Ptl, biocarburants...).</li> </ul>	

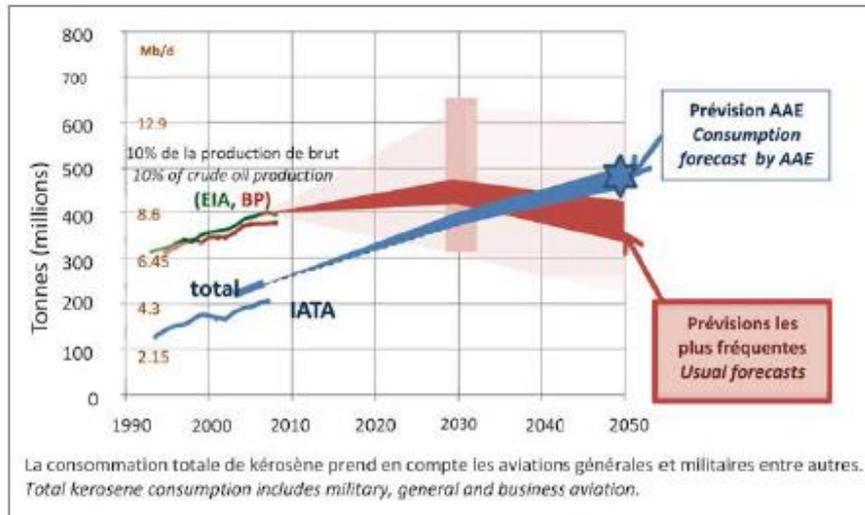


Figure 8: Jet fuel consumption forecast

- L'énergie acoustique totale pourrait diminuer de 15 à 20 % entre 2010 et 2050 :

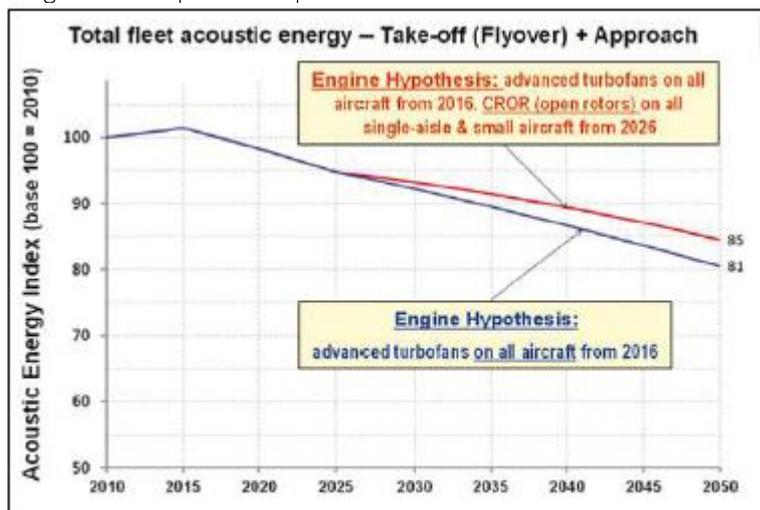


Figure 10: Evolution of total acoustic energy 2010-2050 (FC projection)

*Noise reduction at source, a fundamental step in this approach, requires continued intensive research and development, with proper funding<sup>34</sup>.*

- Idem pour NOx ;
- Gains cumulatifs suivants en matière de consommation de carburant par PKT :
  - 25 % grâce à la technologie et aux nouveaux aéronefs introduits ;
  - 31 % grâce aux améliorations opérationnelles ;
  - 37 % dus à l'augmentation du facteur de charge ;
  - 40 % grâce aux biocarburants ;
  - 47 % grâce à divers types d'effets de compensation du carbone.
- Le trafic aérien augmentant à un rythme plus rapide que les améliorations (multiplicateur 3,1), la consommation totale de carburant doublera au cours de la période, et les émissions totales de CO<sub>2</sub> seront multipliées par 1,6 :

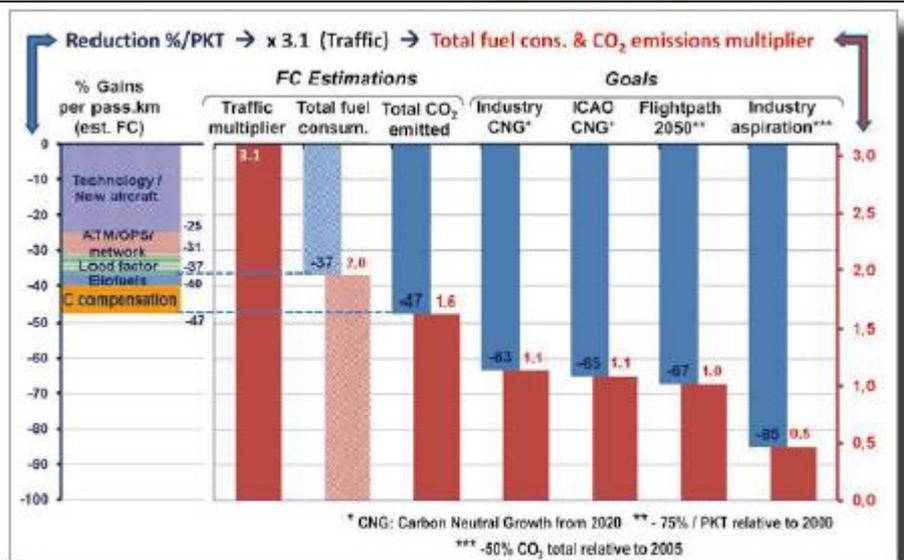
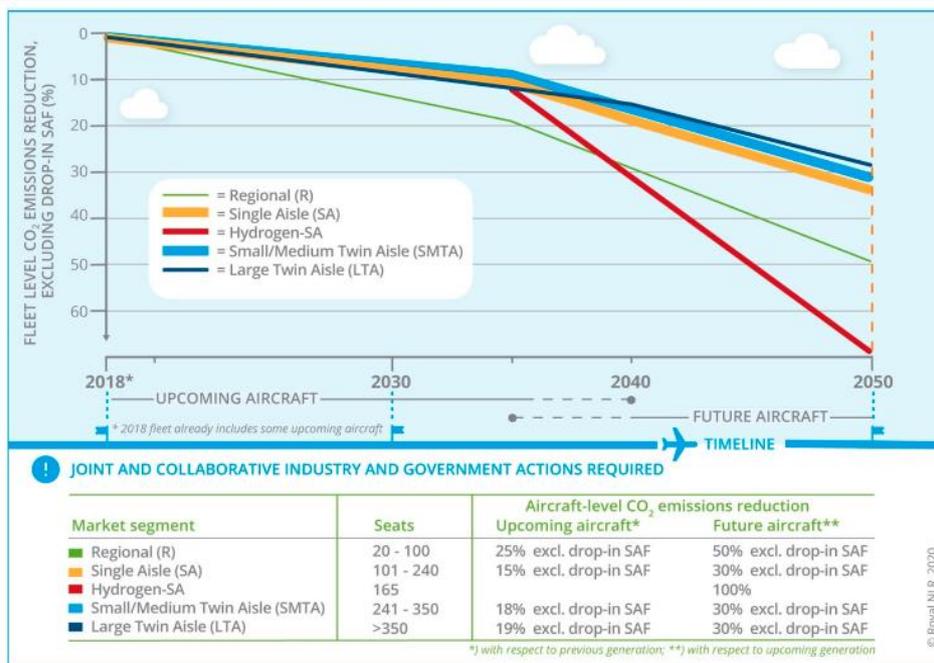


Figure 11: Fuel consumption and CO<sub>2</sub> emissions 2050 / 2010 (comparison: FC projection vs industry / ICAO / EU)

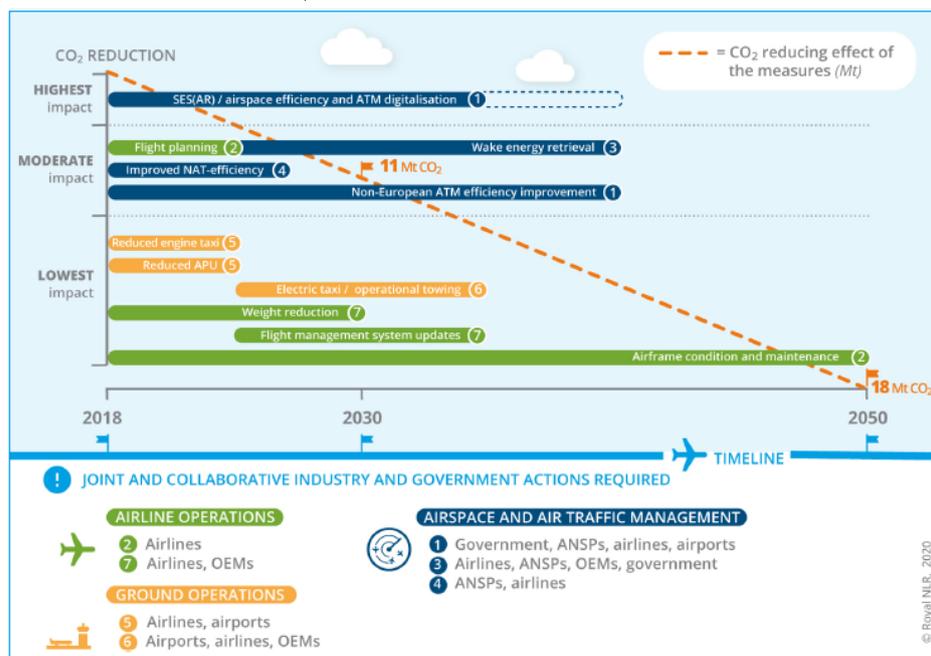
- Arbitrages nécessaires sur les innovations technologiques sur les gains en termes de bruits et d'émissions de GES.

### 13. Destination 2050 – A4E, ACI Europe, ASD, ERA, et CANSO – 2021 [196]

Ambition du scénario	
L'industrie aéronautique européenne s'est engagée à zéro émissions nettes de CO <sub>2</sub> pour tous les vols internes et aux départs de l'Union Européenne en 2050. Destination 2050 montre une voie possible vers cet objectif qui combine de nouvelles technologies, des opérations améliorées, des carburants d'aviation durables et des mesures économiques.	
Caractéristiques principales	
Nature du développeur	Secteur privé
Modèle utilisé	Les auteurs ont développé leur propre modèle.  Le scénario de référence est basé sur les prévisions d'EUROCONTROL concernant les défis de la croissance. L'impact de COVID-19 est pris en compte en supposant que le trafic retrouve progressivement les niveaux d'avant la crise d'ici 2024. Les facteurs de croissance par région de vol sont ensuite appliqués aux données de programmation du Official Airline Guide (OAG). Les émissions sont déterminées au niveau des vols en combinant la base de données des aéronefs d'EUROCONTROL et la banque de données des émissions de l'OACI.
Approche analytique	Les auteurs du scénario ont tout d'abord déterminé le niveau d'ambition de leur scénario en fonction : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Des attentes réalistes des développements futurs dans les domaines des technologies des avions et des moteurs gestion du trafic aérien et de l'exploitation des aéronefs, du carburant aviation durable, des mesures économiques ;</li> <li>• Des politiques (internationales) en matière de climat et de durabilité.</li> </ul> Cette approche hybride leur permet de proposer une voie possible vers la décarbonation de l'aviation en Europe.
Horizon et pas temporel	2050
Périmètre géographique	UE, UK et EFTA (vols internationaux au départ et vols internes)
Types de vols étudiés	Avion commerciale
Impacts analysés	CO <sub>2</sub>
Hypothèses du scénario	
Hypothèses du scénario	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Croissance de 1,4 % par an du nombre de vols commerciaux de passagers, 3,0 % pour le fret ;</li> <li>• Avions hybrides / à hydrogène à partir de 2035 (single aisle aircrafts) – et donc disponibilité de la technologie entre 2027 et 2030</li> </ul>

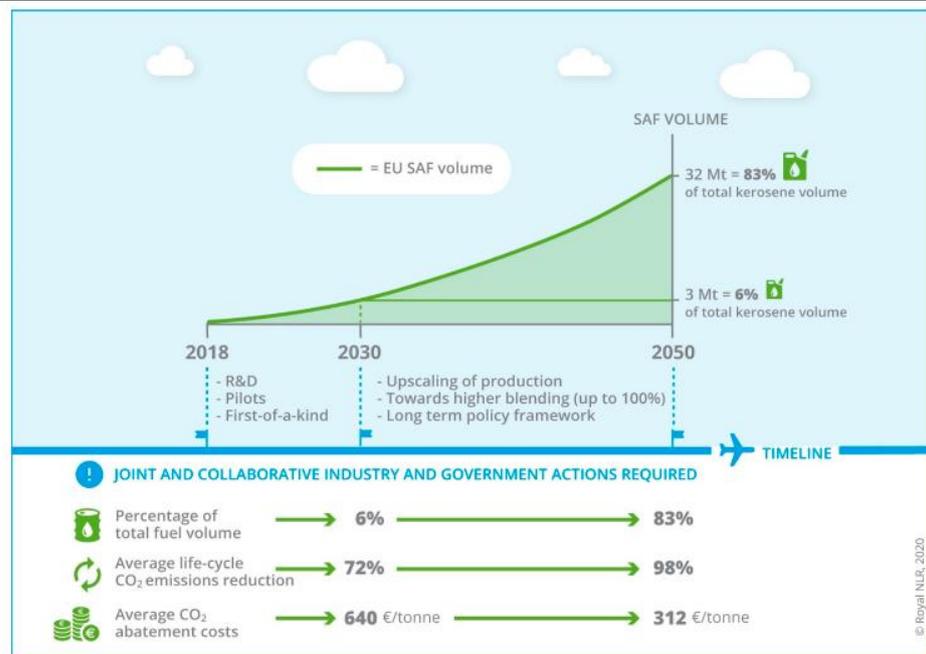


- Amélioration des opérations :



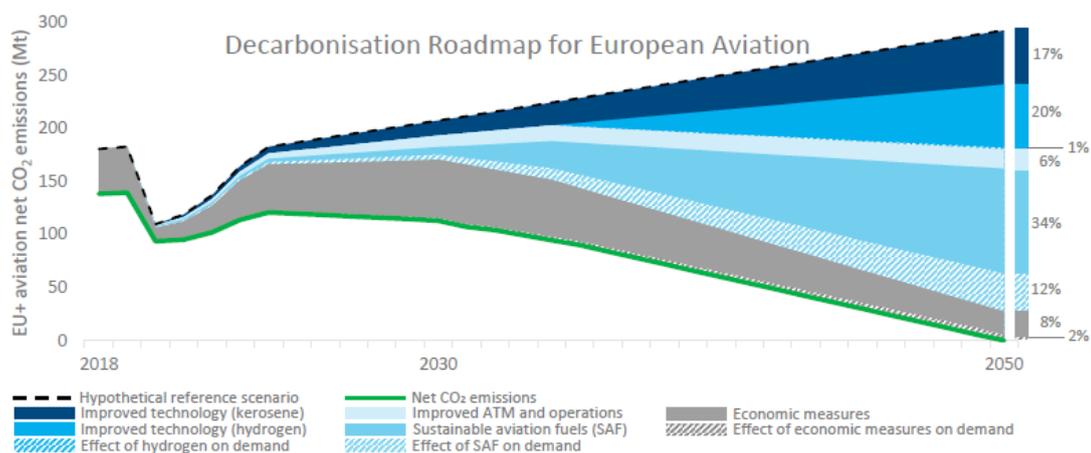
An array of improvements in ATM and aircraft operations yields a 5 to 6% system-level CO<sub>2</sub> emissions reduction in 2030 and 2050 compared to the reference scenario. Requiring actions from all industry actors and governments, most of these improvements could be realised by 2035. Within each of the three groups (highest / moderate / lowest impact), the measures have not been sorted according to impact.

- Production de 32Mt de CAD en 2050 (83 % de la demande en kérosène) – 100 % de réductions d'émissions – à partir de déchets / résidus et cultures ligno-cellulosiques / e-fuels avec de l'électricité renouvelable et du CO<sub>2</sub> issu de DACCS



### Principaux résultats

- Possible d'atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050 grâce à une diminution de 92 % des émissions et à la compensation ou à la capture des 8 % d'émissions restantes ;
- Réductions par rapport au scénario de référence en 2050 :
  - 111 MtCO<sub>2</sub> grâce à l'amélioration de la technologie des avions et des moteurs :
    - 60 MtCO<sub>2</sub> par des avions fonctionnant à l'hydrogène sur les liaisons intra-européennes et domestiques ;
    - 51 millions de tonnes de CO<sub>2</sub> pour les avions fonctionnant au kérosène ou à l'électricité (hybride) ;
  - 18 MtCO<sub>2</sub> grâce à l'amélioration des opérations ;
  - 99 MtCO<sub>2</sub> grâce aux CAD ;
  - 22 MtCO<sub>2</sub> par des mesures économiques (projets d'élimination du carbone uniquement).



Results are presented for all flights within and departing from the EU region<sup>2</sup>. Improving aircraft and engine technology, ATM and aircraft operations, SAF and economic measures all hold decarbonisation potential. Modelled for 2030 and 2050, the impacts are linearly interpolated. The base year for this study is 2018.

## 14. Roadmap to decarbonising European aviation – Transport & Environment – 2018 [167]

Ambition du scénario	
L'objectif de ce rapport est d'examiner si une voie crédible vers des émissions nulles ou quasi nulles existe pour l'aviation européenne. Cette étude correspond aux prévisions de croissance des émissions jusqu'en 2050, examine le rôle que les différentes politiques peuvent jouer dans la réduction de la demande de carburant du secteur, puis propose la manière dont la demande de carburant restante peut être décarbonisée.	
Caractéristiques principales	
Nature du développeur	Société civile / ONG
Modèle utilisé	T&E ont développé leur propre modèle et sur les prévisions de croissance de l'activité aérienne du scénario de référence européen de 2016 (voir également la partie approche analytique).
Approche analytique	<ul style="list-style-type: none"> <li>T&amp;E s'est appuyé sur les prévisions de croissance de l'activité aérienne du scénario de référence européen de 2016 pour projeter les émissions totales de l'aviation sortante des aéroports européens jusqu'en 2050.</li> <li>Ils modélisent ensuite l'application d'une série de mesures visant à réduire la demande de carburant dans toute la mesure du possible, par le biais de l'efficacité énergétique, technique et opérationnelle ou en limitant la croissance du nombre de passagers par des signaux de prix. Le résultat est ce à quoi T&amp;E pense que la demande en carburant du secteur de l'aviation peut raisonnablement être réduite d'ici 2050.</li> <li>Ils se focalisent ensuite sur la manière de décarboniser la demande de carburant restante par l'utilisation de biocarburants avancés durables et de carburants électroniques synthétiques (PtL).</li> </ul>
Horizon et pas temporel	2050
Périmètre géographique	Europe (vols intérieurs et au départ de l'Europe).
Types de vols étudiés	Avion commerciale
Impacts analysés	CO <sub>2</sub>
Hypothèses du scénario	
Hypothèses du scénario	<ul style="list-style-type: none"> <li>Améliorations des opérations et de l'efficacité énergétique permettent de diminuer de 41 % les consommations de carburants en 2050 par rapport à 2010 (0,9 % par an)</li> </ul>
Principaux résultats	
Emissions associées aux deux premiers paquets de mesures	
<ul style="list-style-type: none"> <li>Pour décarboner le secteur de l'aviation, il est nécessaire de diminuer la demande et de décarboner entièrement les carburants en plus des mesures d'amélioration des opérations et de l'efficacité énergétique des avions ;</li> <li>Au vu des capacités limitées de production de biocarburants par rapport aux prévisions de demande du secteur de transport et de l'industrie, les biocarburants ne pourront pas satisfaire tous les besoins du secteur : <ul style="list-style-type: none"> <li>Biocarburants avancés : seulement 11,4 % des consommations en 2050</li> </ul> </li> <li>Il est donc nécessaire de produire des électrocarburants (PtL) : <ul style="list-style-type: none"> <li>Cette production d'électrocarburants est très demandeuse en énergie et nécessite que l'Europe produise une grande quantité d'électricité bas-carbone pour pouvoir être accomplie</li> </ul> </li> <li>Ces carburants coûtent plus cher, ce qui se répercutera à la hausse sur les prix des billets. Recourir à ceux-ci conduira donc à la baisse de la demande.</li> <li>Pour encourager le recours aux CAD, il est nécessaire : <ul style="list-style-type: none"> <li>D'augmenter le prix du carbone pour le secteur ;</li> <li>De renforcer les normes environnementales (contenu carbone) des carburants pour avions ;</li> <li>De renforcer les normes environnementales (émissions des CO<sub>2</sub>) des appareils ;</li> </ul> </li> </ul>	

- Le recours aux SAF et l'augmentation du prix du carbone permettent d'agir sur la demande et d'encourager les économies de carburants (amélioration des opérations et conception des avions);
- Ces mesures doivent être complétées par des incitations au renouvellement des flottes et par la mise en place d'actions de réduction de la demande et de la diminution des émissions des autres GES que le CO<sub>2</sub>.

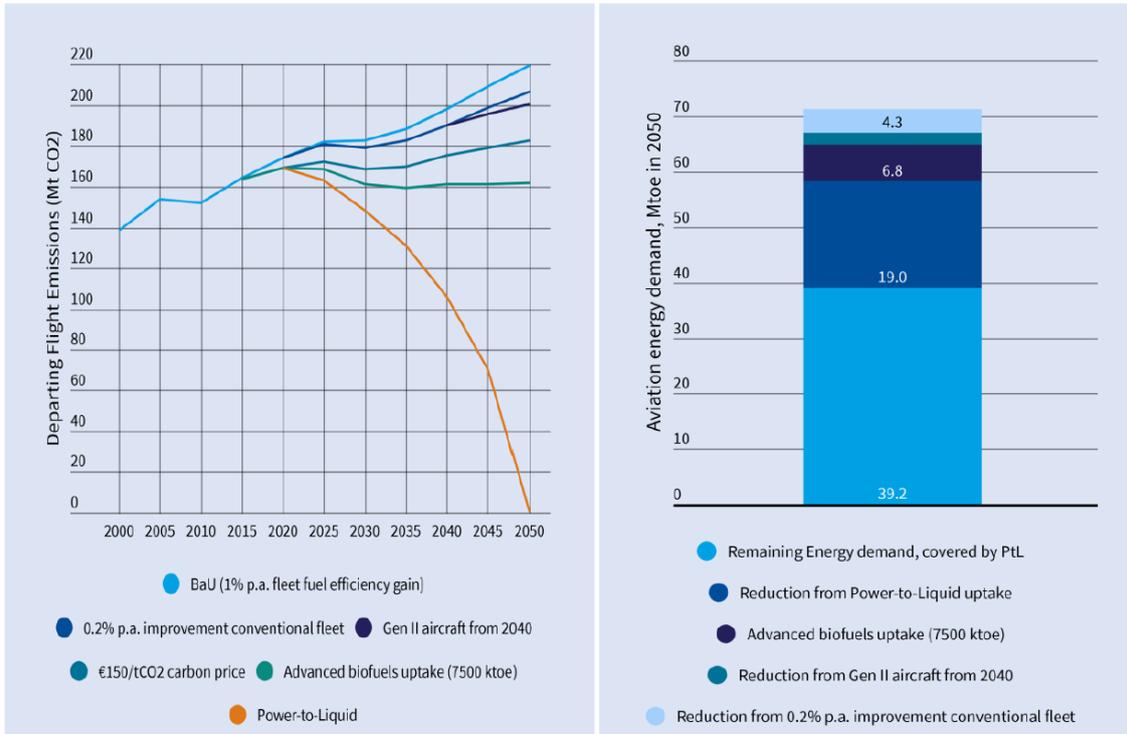


Figure 4: (Left) Reduction in European departing flight CO<sub>2</sub> emissions. (Right) PtL consumption of European departing flights in 2050 after demand reduction measures have been applied.

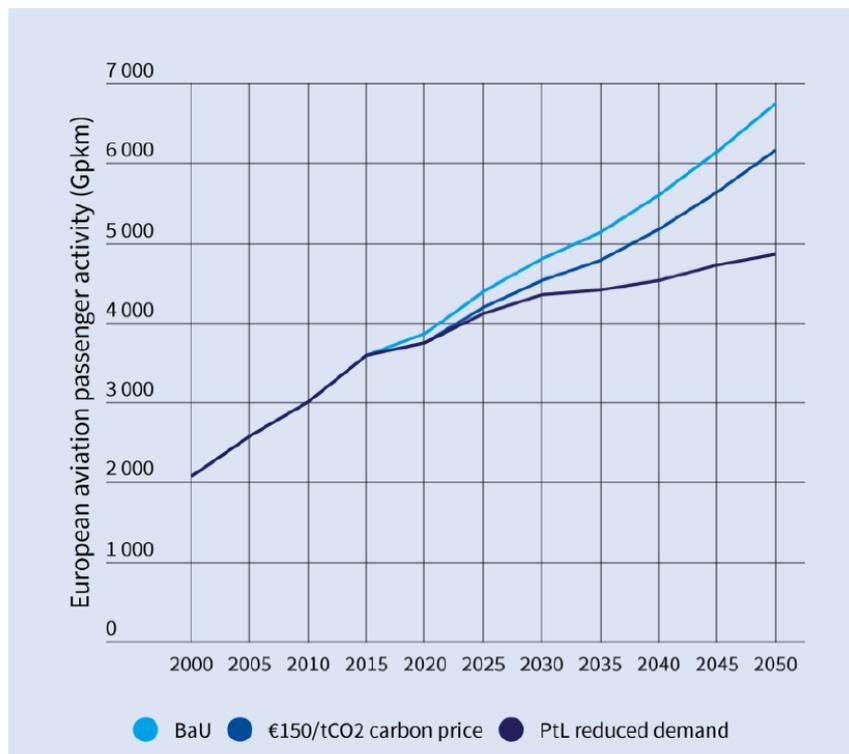


Figure 5: Passenger activity from demand reduction

## 15. Pouvoir voler en 2050 : Quelle aviation dans un monde contraint ? – Supaero Decarbo et Shift Project– 2021 [16]

Ambition du scénario																	
Créer les conditions d'un débat apaisé sur la capacité du secteur aérien à réduire drastiquement ses émissions de gaz à effet de serre, dans des proportions compatibles avec un monde viable en 2100.																	
Caractéristiques principales																	
Nature du développeur	Associations loi 1901																
Modèle utilisé	Modèle développé pour les besoins de l'étude.																
Approche analytique	<p>Approche normative qui répond à la question suivante : « Comment voler en 2050 tout en respectant le budget carbone alloué au secteur aérien pour avoir 67% de chances de rester sous les deux degrés de réchauffement climatique ? » :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Définition et instauration d'un budget carbone pour le transport aérien (au prorata des émissions du secteur entre 2018 et 2050);</li> <li>• Conception de deux scénarios de transition (Maverick et Iceman);</li> <li>• Chiffrage des impacts en termes de GES des mesures de chacun de ces scénarios (amélioration des opérations et de l'efficacité énergétique des appareils, utilisations de CAD et d'hydrogène...);</li> <li>• Prise en compte de l'impact carbone du renouvellement des flottes (approches ACV).</li> <li>• Comparaison de ces impacts avec le budget carbone, et conclusions sur la croissance possible;</li> <li>• Déclinaison du budget-carbone et des scénarios à l'échelle française</li> </ul>																
Horizon et pas temporel	2050																
Périmètre géographique	France : vols intérieurs dont OM, tous les LTO, et moitié des croisières pour les vols internationaux (Périmètre DGAC)																
Types de vols étudiés	Avion commerciale																
Impacts analysés	CO <sub>2</sub>																
Hypothèses du scénario																	
Hypothèses du scénario	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Maverick</th> <th>Iceman</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="2">Reprise du trafic en 2024, croissance de 4% par entre 2024 et 2050</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Amélioration continue des opérations air et sol permettent 10 % de gain en 2050 (plutôt optimiste)</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Utilisation d'hydrogène produit par électrolyse (avec de l'électricité durable d'origine éolienne)</td> </tr> <tr> <td colspan="2">CORSIA permet de compenser 100% des émissions au-delà du niveau de 2019 (toutes les routes, choix de décompter la compensation des émissions)</td> </tr> <tr> <td>Roadmap avion – en 2035 - Régionaux et CMC : hydrogène, +15 % de performance énergétique par génération - Long courriers : 100 % CAD et +15 % de performance énergétique par génération</td> <td>Roadmap avion idem mais décalée de 5 ans</td> </tr> <tr> <td>Renouvellement des flottes : tous les 15 ans (au lieu de tous les 25 actuellement)</td> <td>Renouvellement des flottes : tous les 25 ans</td> </tr> <tr> <td>Carburants alternatifs : - 500 Mt par an (rapport Mc Kinsey) en 2050 → courbe depuis la production actuelle (61 Mt) → très ambitieux – 100 % des besoins à partir de 2039 (2049 pour la France)</td> <td>Carburants alternatifs : - 250 Mt par an (rapport Mc Kinsey) en 2050 → courbe depuis la production actuelle (61 Mt) → très ambitieux</td> </tr> </tbody> </table>	Maverick	Iceman	Reprise du trafic en 2024, croissance de 4% par entre 2024 et 2050		Amélioration continue des opérations air et sol permettent 10 % de gain en 2050 (plutôt optimiste)		Utilisation d'hydrogène produit par électrolyse (avec de l'électricité durable d'origine éolienne)		CORSIA permet de compenser 100% des émissions au-delà du niveau de 2019 (toutes les routes, choix de décompter la compensation des émissions)		Roadmap avion – en 2035 - Régionaux et CMC : hydrogène, +15 % de performance énergétique par génération - Long courriers : 100 % CAD et +15 % de performance énergétique par génération	Roadmap avion idem mais décalée de 5 ans	Renouvellement des flottes : tous les 15 ans (au lieu de tous les 25 actuellement)	Renouvellement des flottes : tous les 25 ans	Carburants alternatifs : - 500 Mt par an (rapport Mc Kinsey) en 2050 → courbe depuis la production actuelle (61 Mt) → très ambitieux – 100 % des besoins à partir de 2039 (2049 pour la France)	Carburants alternatifs : - 250 Mt par an (rapport Mc Kinsey) en 2050 → courbe depuis la production actuelle (61 Mt) → très ambitieux
	Maverick	Iceman															
	Reprise du trafic en 2024, croissance de 4% par entre 2024 et 2050																
	Amélioration continue des opérations air et sol permettent 10 % de gain en 2050 (plutôt optimiste)																
	Utilisation d'hydrogène produit par électrolyse (avec de l'électricité durable d'origine éolienne)																
	CORSIA permet de compenser 100% des émissions au-delà du niveau de 2019 (toutes les routes, choix de décompter la compensation des émissions)																
	Roadmap avion – en 2035 - Régionaux et CMC : hydrogène, +15 % de performance énergétique par génération - Long courriers : 100 % CAD et +15 % de performance énergétique par génération	Roadmap avion idem mais décalée de 5 ans															
Renouvellement des flottes : tous les 15 ans (au lieu de tous les 25 actuellement)	Renouvellement des flottes : tous les 25 ans																
Carburants alternatifs : - 500 Mt par an (rapport Mc Kinsey) en 2050 → courbe depuis la production actuelle (61 Mt) → très ambitieux – 100 % des besoins à partir de 2039 (2049 pour la France)	Carburants alternatifs : - 250 Mt par an (rapport Mc Kinsey) en 2050 → courbe depuis la production actuelle (61 Mt) → très ambitieux																

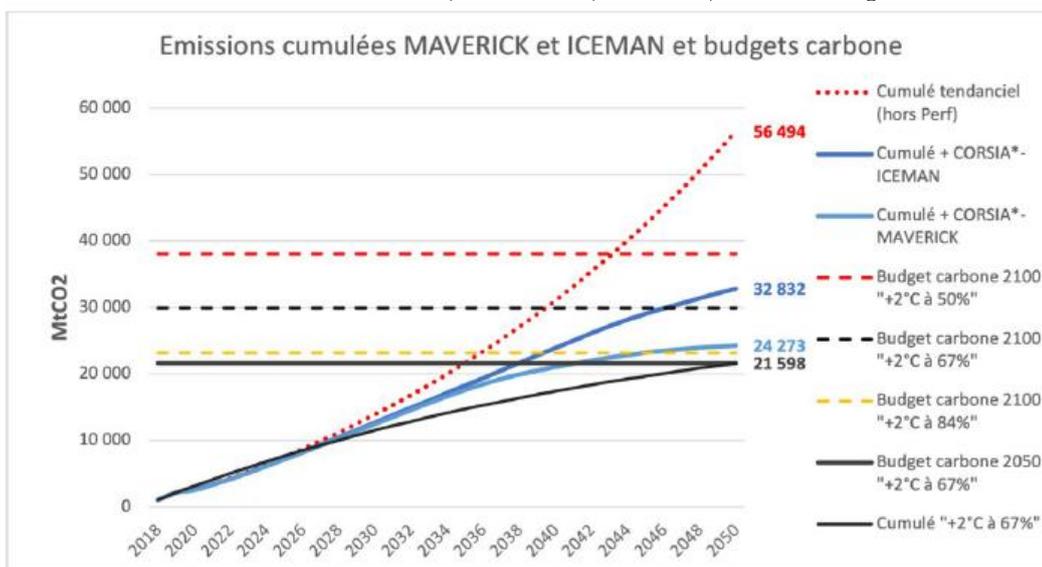
- Aviation est prioritaire pour consommer des biocarburants
- Biocarburants peuvent améliorer jusqu'à 70 % le bilan carbone par km. Passager.

- Aviation est prioritaire à 50 % pour consommer des biocarburants

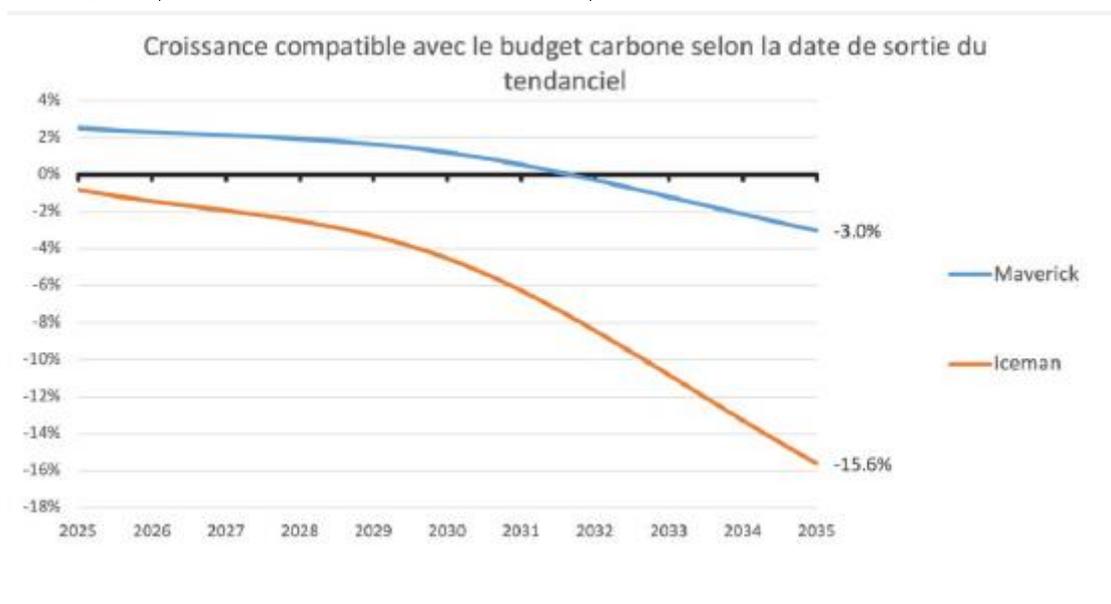
## Principaux résultats

### Emissions associées aux deux premiers paquets de mesures

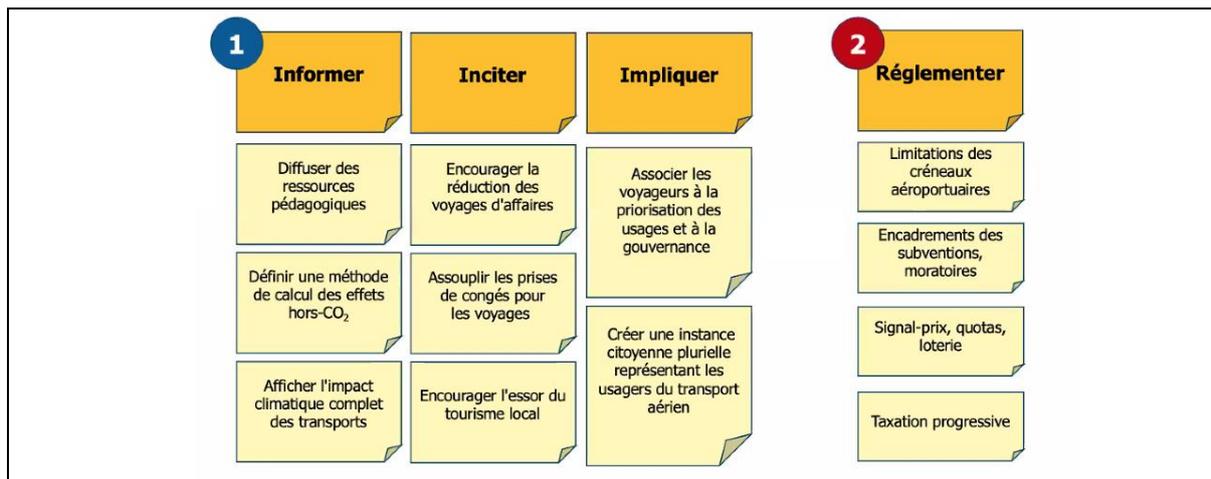
- Il est nécessaire de faire décroître les émissions de CO<sub>2</sub> du secteur de 3,4 % par an pour respecter le budget carbone alloué ;
- Les mesures des scénarios étudiés ne permettent pas de respecter le budget carbone :



- Il est donc nécessaire d'abaisser le taux de croissance de la demande de trafic à partir de 2025 à 2,52 % pour le scénario Maverick et à -0,8 % pour le scénario Iceman :



- A l'échelle française :
  - Il est nécessaire de mettre en place des mesures de sobriété pour respecter le budget carbone français pour ne pas dépasser 0,71 % de croissance de la demande dans le scénario Maverick et -1,75 % dans Iceman.
  - Capacité de production de 2,37 Mt de bio-carburants de deuxième génération et de 4Mt de PTL en 2050
  - Pas d'importation de carburants et besoins pourvus à 100 % à partir de 2049 (scénario Maverick)



## 16. Autres scénarios étudiés mais non inclus dans la synthèse finale

Les scénarios suivants n'ont pas été inclus dans la synthèse finale car ils ne comportaient pas suffisamment d'éléments sur le secteur aérien, ou avaient une ambition trop éloignée de l'objectif de l'étude.

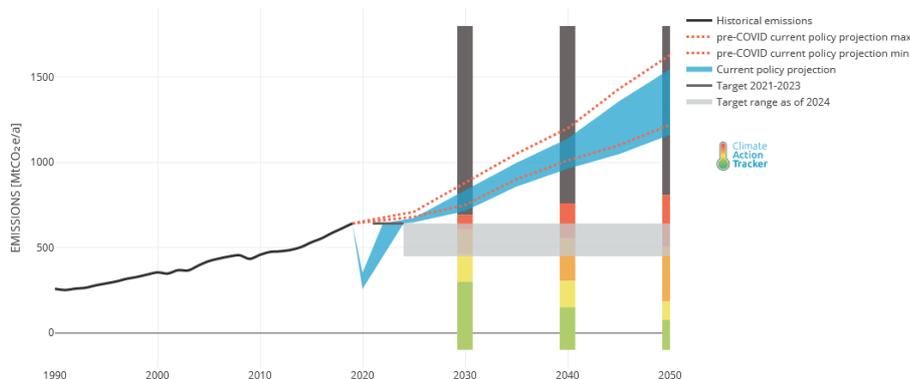
### **International Aviation – Climate Action Tracker – 2020** [146]

Ambition du scénario	
The Climate Action Tracker (CAT) étudie si l'objectif de croissance neutre en carbone des émissions l'aviation civile internationale à partir de 2020 adopté par l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI) est compatible avec l'Accord de Paris.	
Caractéristiques principales	
Nature du développeur	ONG
Modèle utilisé	Le CAT utilise son propre modèle pour comparer les prévisions d'évolutions des émissions de CO <sub>2</sub> du secteur de l'aviation civile internationale issues des scénarios de l'OACI (qu'il adapte) à cinq catégories de trajectoires d'évolution des émissions correspondant à cinq scénarios de réchauffement global différents (de +1,5°C à plus de +4°C).
Approche analytique	Le CAT calcule tout d'abord les trajectoires d'évolution des émissions du secteur de l'aviation civile internationale compatibles avec différentes catégories de trajectoires de réchauffement global. Il mobilise pour ce faire la base de données IAM (Integrated Assessment Models) du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) dont il extrait 5 catégories de trajectoires d'évolution des émissions correspondant à 5 niveaux de réchauffement global différents (de moins de 1,5°C à plus de 4°C). Il calcule ensuite les trajectoires possibles de croissance des émissions de CO <sub>2</sub> du secteur de l'aviation civile internationale en se basant sur celles de l'OACI. Il observe enfin à quelle catégorie de trajectoires de réchauffement global correspondent ces prévisions de croissance des émissions.
Horizon et pas temporel	Le CAT calcule l'évolution des émissions de CO <sub>2</sub> du secteur de l'aviation civile internationale entre 2020 et 2050.
Périmètre géographique	Monde
Types de vols étudiés	Avion commerciale
Impacts analysés	CO <sub>2</sub>
Hypothèses du scénario	
Hypothèses du scénario	<p>Pour calculer les trajectoires d'évolution des émissions du secteur de l'aviation civile internationale compatibles avec différentes catégories de trajectoires de réchauffement global, le CAT fait l'hypothèse que l'aviation civile internationale doit se décarboner au même rythme que les secteurs de l'industrie ou de la production d'énergie, et doit donc atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2060. Les prévisions de croissances des émissions de CO<sub>2</sub> du secteur de l'aviation civile internationale sont les toutes les trajectoires situées entre :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Une trajectoire basse : <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Chute de 60 % des émissions en 2020 par rapport à 2019 ;</li> <li>○ Retour des émissions au niveau de 2019 en 2024 ;</li> <li>○ Augmentation des émissions au même rythme que dans le scénario optimiste d'amélioration technologique de l'OACI (1,37 % par an).</li> </ul> </li> <li>• Une trajectoire haute : <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Chute de 45 % des émissions en 2020 par rapport à 2019 ;</li> <li>○ Retour des émissions au niveau de 2019 en 2022 ;</li> <li>○ Augmentation des émissions au même rythme que dans le scénario pessimiste d'amélioration technologique de l'OACI.</li> </ul> </li> </ul> <p>Ces deux trajectoires reposent également sur un certain nombre d'hypothèses au niveau de :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• L'amélioration des opérations ;</li> </ul>

- L'utilisation de technologies de décarbonation (électrification, carburants liquides (power-to-liquid), biocarburants et hydrogène).

### Principaux résultats

- L'objectif de croissance neutre en carbone à partir de 2020 est classé comme « gravement insuffisant » par le CAT, qui indique que si tous les autres secteurs économiques avaient des objectifs de la même ambition, cela conduirait à un réchauffement global de plus de 4°C.
- Cette notation a été motivée par les résultats du modèle et par les faits que :
  - Le mécanisme de compensation CORSIA (Régime de compensation et de réduction de carbone pour l'aviation internationale) et le recours aux carburants alternatifs ne permettront probablement pas de réduire les émissions de manière significative selon le CAT ;
  - L'objectif de réduction des émissions de l'OACI ne concerne que les émissions de CO<sub>2</sub> et pas les émissions d'autres GES comme les NO<sub>x</sub> ou les cirrus à la sortie des réacteurs des avions.
- Pour être compatibles avec l'Accord de Paris, les émissions du secteur de l'aviation civile internationale devraient être en dessous de 300 Mt en 2030 et être nulles à l'horizon 2060.



### A clean planet for all – Commission Européenne - 2018 [238]

- Pas d'avions électriques
- Biocarburants avancés, carburants de synthèse, hybridation, amélioration de l'efficacité énergétique
- Investissements pour faire du TGV un véritable moyen de substitution à l'avion dans l'UE pour les courtes et moyennes distances

### ReFuelEU Aviation - Sustainable Aviation Fuels - Commission Européenne – 2020 [239]

- Politiques et Mesures UE :
  - UE ETS et CORSIA
  - Amélioration des opérations
  - Amélioration de l'efficacité énergétique des avions
  - CAD (liquid advanced biofuel or electro-fuels : Directive (EU) 2018/2001)
- Pas d'avion électrique ou hybride dans les prochaines décennies
- Pas de suivi de la production et de l'utilisation de CAD en Europe
- CAD = 0,05% de la consommation de carburant
- La plupart des CAD sont aujourd'hui importés ou stockés dans des pays tiers (USA par exemple)
- Directives et instruments dont les impacts sont limités et qu'il faudrait réviser :
  - The Renewable Energy Directive includes an obligation for fuel suppliers to incorporate a share of renewable energy in transport (advanced biofuels and e-fuels can contribute).
  - The recast Renewable Energy Directive to be implemented by June 2021
  - UE-ETS: mechanisms intended to reward emission reductions including via the use of SAF
  - The Energy Taxation Directive contains provisions with the ability to favour certain types of fuel.
  - Fuels Quality Directive
  - Airport Charges Directive
  - Energy Taxation Directive
  - Single European Sky's charging scheme
- Enjeux production SAF :
  - Coût de production du SAF = double de celui des carburants usuels
  - Haute volatilité des coûts des matières premières qui représentent une grosse partie des coûts des matières premières

- Production de SAF à partir de déchets est limitée car peu de réserves de déchets et autres usages concurrents plus efficaces
- Concurrence avec les autres modes de transport
- Scénario tendanciel : 2,8 % de SAF en 2050
- Politiques et Mesures :
  - Imposer un minimum de part de SAF
  - Directive sur l'énergie renouvelable : multiplicateur de 1,2 pour l'aérien par rapport aux cibles des membres
  - Mécanisme d'enchères central
  - Subventions
  - Détermination du caractère prioritaire du secteur aérien pour les SAF
  - Système de suivi des consommations et de la production
  - Accords volontaires, plateforme d'échanges...

**negaWatt 2017-2050 – Association negaWatt - 2018** [240]

- Disparition progressive des vols intérieurs grâce au train (déplacements inférieurs à 800 km)
- Concurrence des trains pour les trajets supérieurs à 800 km (autant pour le tourisme que pour les pros)
- Sobriété : diminution des déplacements de plus de 800 km (perso) et 1500 km (pro)
- Biocarburants de deuxième génération à partir de matériaux ligno-cellulosiques (paille, bois)
- Progrès technologiques
- Voir détails évolutions de la demande ci-dessous

**Tableau 40 – Évolution des voyageurs.km parcourus par mode de transport et par habitant**

		2010	2020	2030	2040	2050	2008-2050
<b>Avion en vol intérieur</b>	Mds de voy.km	15	16	11	2	0	-100%
	voy.km/hab	244	248	162	28	0	-100%
<b>Avion en vol international</b>	Mds de voy.km	142	180	156	107	93	-35%
	voy.km/hab	2 277	2 727	2 283	1 516	1 280	-44%

**Net Zero Europe – European Climate Foundation - 2018** [241]

- Electrification après 2040 sur le court-courrier
- Stratégie de diminution de la demande
- Amélioration des opérations et de l'efficacité énergétique

**ZEN 2050 – Entreprises pour l'Environnement – 2019** [242]

- Réduction modérée des émissions (environ 50 %)
- Forte croissance de la demande
- SAF mais problème sur la production
- Amélioration de l'efficacité
- Reconnaissance que les progrès en termes d'efficacité énergétique ne suffiront pas
- Nécessité de déploiement d'avions électriques / à hydrogène

**Aviation 2035 – ADL – 2018** [243]

- Croissance forte de la demande
- Trois types d'acteurs :
  - Fournisseurs d'appareils (constructeurs...)
  - Fournisseurs de transport aérien (compagnies, distributeurs)
  - Fournisseurs d'infrastructures (aéroports, navigation aérienne...)
- Scénario de base :
  - Automatisation des processus
  - Changement du modèle économique des compagnies qui sont désormais des plateformes médiatiques, les acteurs les plus avancés offrant des billets gratuits.

## ANNEXE 3 – FICHES LEVIERS

### Introduction

Les fiches présentées ci-dessous sont celles qui ont été présentées et utilisées dans le cadre du deuxième atelier de travail avec les parties prenantes du secteur. Elles datent donc du mois de juin 2021, et sont par conséquent antérieures au reste du rapport.

Classification des leviers de décarbonation pris en compte dans l'étude et correspondance avec les fiches fournies lors de l'Atelier n°2 de consultation des parties prenantes du secteur

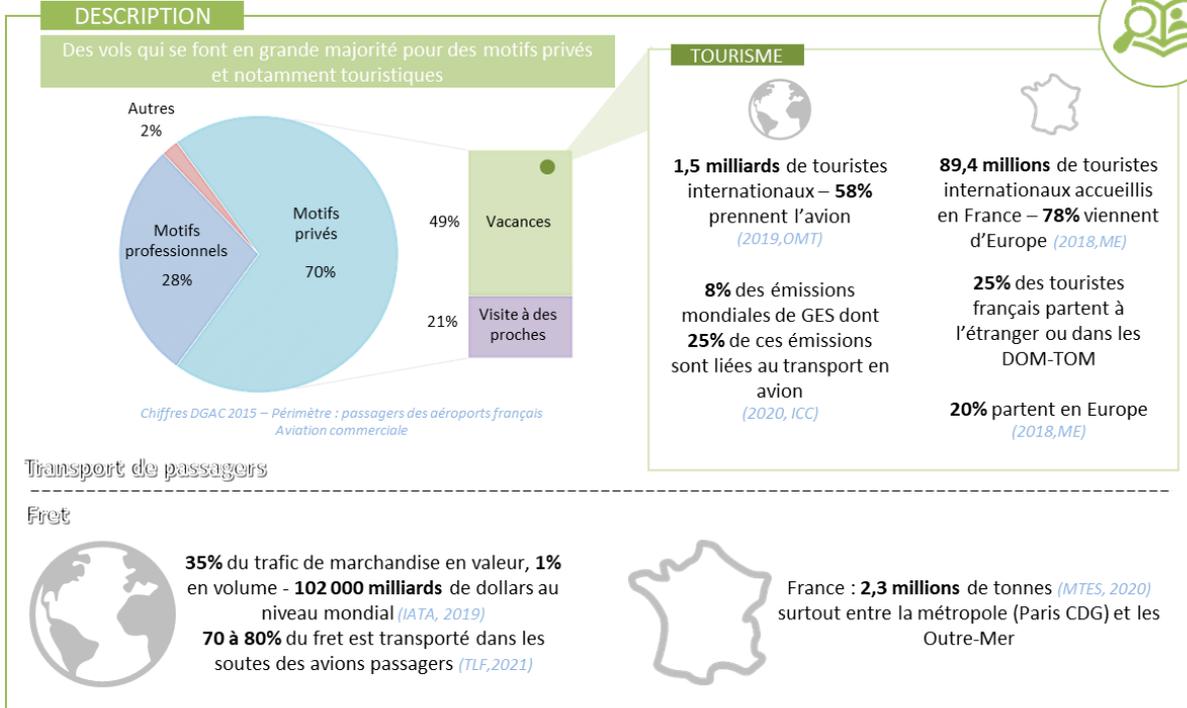
<i>Leviers</i>	<i>Sous-leviers</i>	<i>Fiches correspondantes</i>
Réduction / modération du trafic	Diminution de la quantité de transport aérien (nombre de vols et distance parcourue)	Fiche 1 – Diminution de la quantité de transport aérien
	Augmentation du prix du transport aérien	Fiche 2 – Augmentation du prix du transport aérien
Report modal	Développement de l'intermodalité et de solutions alternatives de transport	Fiche 3 – Intermodalité et modes de transport alternatifs
Taux de remplissage	Augmentation des taux de remplissage	Pas de fiche
Efficacité énergétique	Amélioration de l'efficacité énergétique des appareils	Fiche 4 – Efficacité énergétique et renouvellement des flottes
	Renouvellement des flottes	
	Amélioration des opérations en vol	Fiche 5 – Amélioration des opérations
Intensité carbone	Décarbonation des opérations au sol	Fiche 6 – Carburants aériens durables (CAD)
	Augmentation du taux d'incorporation de CAD	
	Electricité décarbonée	Fiche 7 – Hydrogène et électricité décarbonés
	Hydrogène décarboné	

# Fiche 1: Diminution de la quantité de transport aérien

Fiche levier

## Diminution de la quantité de transport aérien

La quantité de transport aérien (nombre de vols et distance) dépend de la demande en voyages et de l'offre disponible



## DIMINUTION DE LA QUANTITÉ DE TRANSPORT AÉRIEN

### TENDANCE

Une partie des voyageurs sont prêts à changer leurs pratiques pour des raisons environnementales

**Phénomène Flygskam** : mot suédois qui désigne la honte de prendre l'avion avec un pic de diffusion à l'été 2019. On constate une multiplication des initiatives qui militent pour la réduction du transport aérien. **20%** des Français seraient prêts à ne plus monter dans un avion pour réduire leurs émissions (ADEME, 2020).

Pendant la crise du COVID : les voyageurs se déclarent prêts à faire entre **5 et 6 heures** de trajet en plus pour des voyages personnels, et **4 heures** supplémentaires pour des voyages professionnels dans l'optique de remplacer l'avion par le train (UBS, 2021 – Enquête dans 4 pays européens et en Chine).

### SOBRIETE

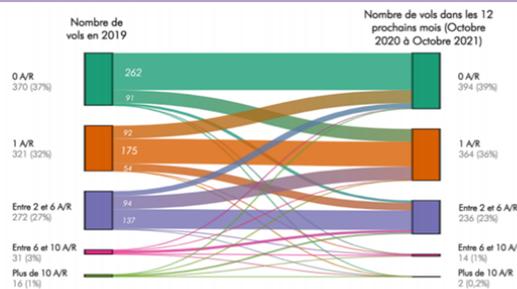
**Définition** : recherche de modération dans la production et de la consommation de biens et de services nécessitant des ressources énergétiques ou matérielles. Limitation des biens et services produits et consommés à un niveau jugé suffisant et non superflu (ADEME 2019).

**Objectif** : éviter la surconsommation des ressources. Si toute l'Humanité vivait comme les Français, trois planètes Terre seraient nécessaires pour satisfaire ses besoins (Negawatt, 2018). Cet objectif est inscrit dans la **loi pour la Transition énergétique pour la croissance verte** (2015).

Cependant, il ne faut pas surévaluer la part de voyageurs prêts à modifier leurs pratiques

61% des Français comptent prendre l'avion dans les 12 prochains mois (vs. 63% en 2019)

Infographie sur les prévisions de voyage des Français dans le cadre de la reprise post-COVID  
Source : Infographie provenant de la Chaire Pégase, Rapport « Transport aérien : l'impact du COVID-19 sur le comportement des Français »



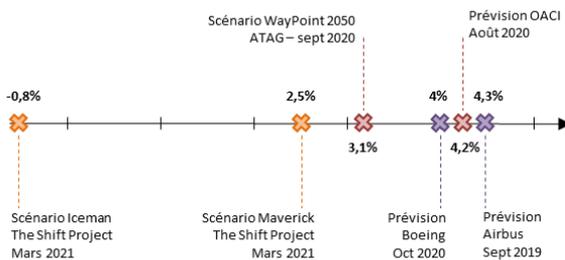
Que retenir de ce graphique ?

1 - Le comportement des passagers aériens est stable : ceux qui ont prévu de voyager « X fois » dans les 12 prochains mois avaient, en moyenne, voyagé « X fois » en 2019 aussi.

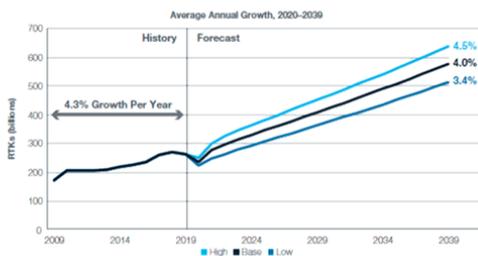
2 - Le nombre total de trajets effectués devrait légèrement baisser avec une réduction du nombre des vols effectués par ceux qui ont voyagé le plus en 2019 (plus de 2 aller-retours).

### PROSPECTIVE

Un trafic qui devrait augmenter d'ici 2050, en tendanciel



Comparaisons des taux de croissance de la demande utilisée dans différents scénarios en taux de croissance annuel moyens du nombre de PKT (passager.kilomètre.transportés)  
Source : ICC avec des données DGAC



Taux de croissance du trafic de fret entre 2020 et 2039  
Source : Boeing Date : 4<sup>ème</sup> trimestre 2020

La quantité de transport aérien peut donc aussi bien baisser du fait d'une diminution de la demande que d'une diminution de l'offre disponible suite à la réglementation du secteur (quotas de vols, limitation des créneaux aéroportuaires...).

La question des modes de vie et de la place de l'aérien dans le futur des Français est en général peu étudié et peu pris en compte dans les analyses prospectives, comme le souligne de récents travaux de l'IDDRI

### SCENARIO ADEME 2030-2050

Scénario qui illustre l'hétérogénéité des modes de vie dans un avenir fondé sur une consommation d'énergie plus sobre (divisée par deux en 2050 par rapport à 2010) et sur des sources majoritairement renouvelables. 8 familles représentatives de la population appliquent la notion de sobriété dans des domaines différents et à des degrés différents, sans remettre en cause leur bien-être, quels que soient leur lieu de vie, leurs revenus, leur organisation familiale ou leur âge. Dans ce scénario, le changement de mode de vie repose sur l'auto-contrôle et la régulation de ses désirs.

**5** Patrick et Christine, couple de retraités aisés périurbain, pourraient plus profiter du développement des voitures en libre-service pour rejoindre le centre-ville et ainsi améliorer leur bilan carbone fortement impacté par des voyages annuels en avion. Ils ont effectué de gros travaux de rénovation énergétique dans leur pavillon pour des questions de confort, ce qui améliore leur consommation énergétique. (page 42)

En 2030

En 2050

Philippine et Abel ont deux enfants et vivent dans une ville moyenne. La famille utilise les transports en commun et le vélo électrique et possède une voiture hybride rechargeable qui est mise en auto-partage. Ils ont prévu cette année un voyage de longue durée en Chine en avion. (page 72)

## REFERENCES



- Enquête national des passagers aériens, DGAC, 2015
- P. Zembri, « Chapitre 9. Transports et mobilités : quelles limites ? », in *Géographie humaine. Mondialisation, inégalités sociales et enjeux environnementaux*, 2020.
- « Seriez-vous prêt à renoncer à l'avion par souci écologique? », *RTBF Tendance*, févr. 16, 2020.  
[https://www.rtb.be/tendance/green/detail\\_seriez-vous-pret-a-renoncer-a-l-avion-par-souci-ecologique?id=10432770](https://www.rtb.be/tendance/green/detail_seriez-vous-pret-a-renoncer-a-l-avion-par-souci-ecologique?id=10432770)  
(consulté le mars 24, 2021)
- DGAC, « Image du transport aérien en France », 2014. [En ligne]. Disponible sur:  
<https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/EIAC%202013%20VF.pdf>.
- Ville, Rail et Transports, « Pour la banque UBS, le train l'emportera sur l'avion après la crise », *Ville, Rail et Transports*, avr. 28, 2020. <https://www.ville-rail-transports.com/ferroviaire/pour-la-banque-suisse-ubs-le-rail-lemportera-sur-l-avion-apres-le-coronavirus/> (consulté le avr. 07, 2021)
- Chaire Pégase : Transport aérien : l'impact du COVID-19 sur le comportement des Français, décembre 2020
- Scénario Ademe, Visions énergie climat 2030/2050 : quels modes de vie pour demain ?
- Faits et chiffres de l'OACI [https://www.icao.int/sustainability/Pages/FR/Facts-Figures\\_WorldEconomyData\\_FR.aspx](https://www.icao.int/sustainability/Pages/FR/Facts-Figures_WorldEconomyData_FR.aspx)
- IDDRI, Mieux représenter les modes de vie dans les perspectives énergie-climat, février 2019,  
[https://www.iddri.org/sites/default/files/PDF/Publications/Catalogue%20Iddri/Etude/202002-ST0220\\_25FEV\\_0.pdf](https://www.iddri.org/sites/default/files/PDF/Publications/Catalogue%20Iddri/Etude/202002-ST0220_25FEV_0.pdf)

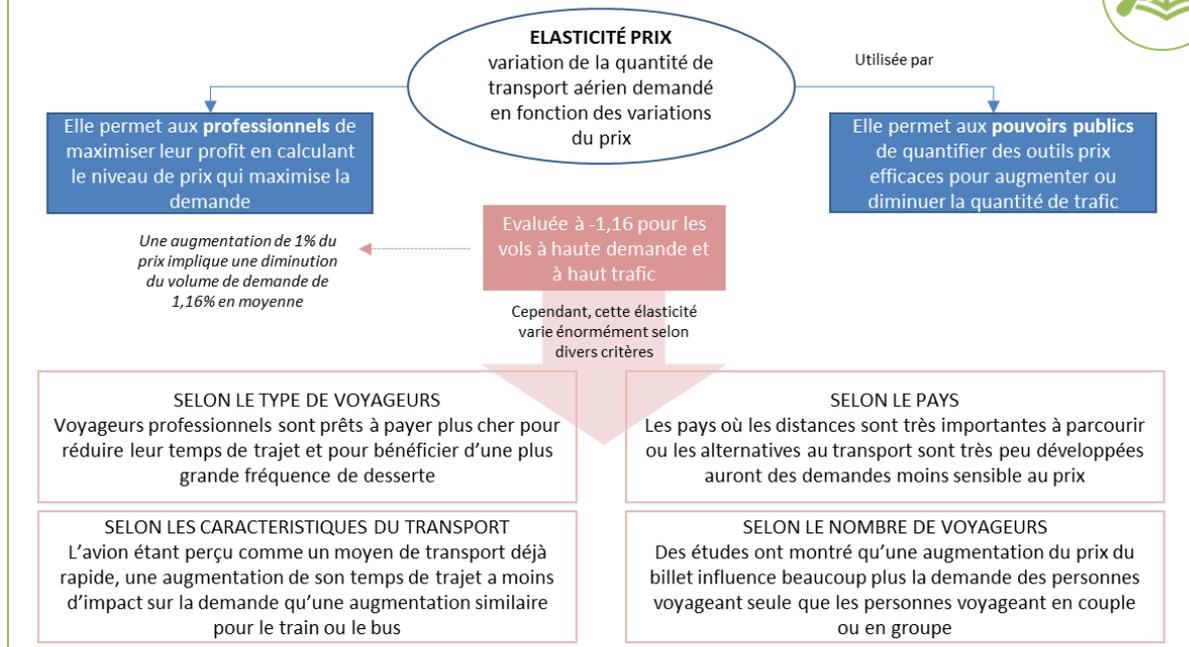
## Fiche 2 : Augmentation du prix du transport aérien

Fiche levier



### Augmentation du prix du transport aérien

#### DESCRIPTION

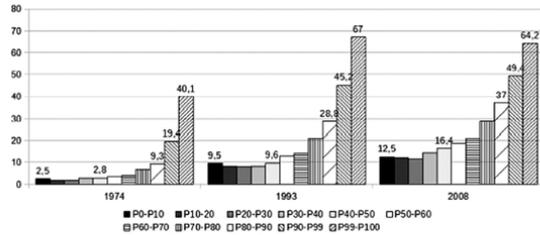


#### RETROSPECTIVE

Un service qui s'est démocratisé mais dont l'usage reste hétérogène et croissant avec l'augmentation du niveau de vie

Dans les années 70, seul 5,5% de la population française avait voyagé en avion dans l'année ou l'année précédente. En 2008, cette part s'élevait à 22%.

Taux d'accès au transport aérien



Taux d'accès au transport aérien selon le niveau de revenus par unité de consommation Source : Y. Demoli et J. Subtil

Le taux d'accès est défini comme la part des personnes qui ont pris au moins une fois l'avion au cours des deux années précédentes l'enquête

#### Des inégalités qui perdurent

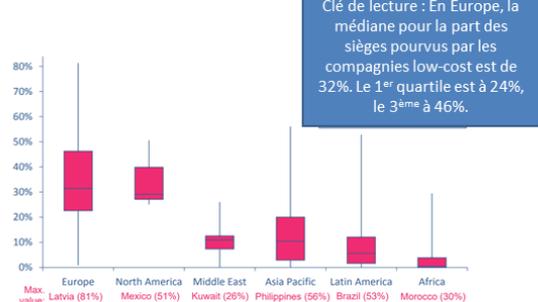
Si la diminution du prix sur certains trajets a bien permis de favoriser l'accès des classes populaires au transport aérien, elle a mis en place une **démocratisation ségrégative** : l'avion n'est pas utilisé de la même manière par l'ensemble des classes sociales ni avec la même intensité.

Entre 1981 et 2008, l'indice de Gini qui reflète l'importance des inégalités a **augmenté sur les trajets longues distances**, ce qui signifie que la part des classes sociales les plus aisées est plus importante dans cette catégorie de voyage que leur part dans la population globale. Source : Y. Demoli et J. Subtil

#### Le développement d'une offre low-cost

**Modèle économique** : réduire au maximum les coûts d'exploitation par l'utilisation intensive des avions pour des liaisons de point à point sur des trajets généralement courts.

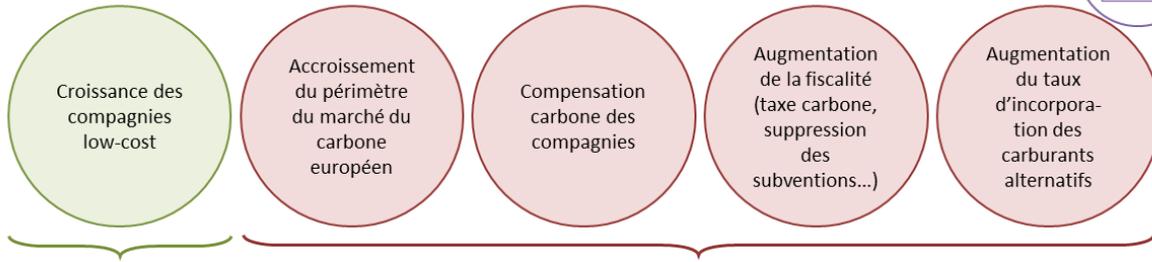
Part des sièges pourvus par les compagnies low-cost par région du monde en 2016 Source : IATA



Le développement de ces offres a constitué un nouveau type de concurrent pour les compagnies traditionnelles et occasionner une pression importante sur le prix des billets, notamment sur certains trajets de moyen terme comme les trajets intra-européens.

## AUGMENTATION DU PRIX DU TRANSPORT AÉRIEN

### TENDANCE



#### PRESSION A LA BAISSÉ DU PRIX

##### Concurrence et guerre des prix

##### Meilleure résistance des low-costs à la crise sanitaire

- Plus de trésorerie;
- Flexibilisation du travail;
- Reprise plus rapide de la demande par des prix plus bas;
- Rentables sur des vols courts qui sont ceux qui rouvrent en premier.

Source : étude Fondapol

#### PRESSION A LA HAUSSE DU PRIX

##### Utiliser le prix pour intégrer les externalités environnementales négatives du transport aérien

**Externalité négative** : situation dans laquelle un agent économique provoque par son activité des effets négatifs sur d'autres agents sans que cela ne soit pris en compte dans le calcul économique.

De nombreuses initiatives sont mises en place pour essayer d'internaliser cette contribution, ce qui peut contribuer à long terme à **une augmentation conséquente du prix du billet d'avion** si le prix de la tonne de carbone émise augmente et si les compagnies aériennes répercutent cette augmentation sur les consommateurs.

Ex : Selon la Commission Européenne, la suppression des exemptions fiscales sur le kérosène conduirait à une **augmentation du prix du billet de 10% et à une baisse de 11% du nombre de passagers**.

##### Coût de la décarbonation du carburant

Coût de production des carburants alternatifs

**1,02\$/L - 4,17\$/L**

selon le type de carburant

Coût de production du kérosène

**0,47\$/L**

Source : The Shift Project

### REFERENCES

- S. Perera et D. Tan, « In search of the "Right Price" for air travel: First steps towards estimating granular price-demand elasticity », *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 130, p. 557-569, déc. 2019, doi: 10.1016/j.tra.2019.09.013.
- H. Zhou *et al.*, « Analysing travel mode and airline choice using latent class modelling: A case study in Western Australia », *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 137, p. 187-205, juill. 2020, doi: 10.1016/j.tra.2020.04.020.
- D. Gillen et H. Hashemina, « Estimating the demand responses for different sizes of air passenger groups », *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 49, p. 24-38, mars 2013, doi: 10.1016/j.trb.2012.11.004.
- Y. Demoli et J. Subtil, « Boarding Classes. Mesurer la démocratisation du transport aérien en France (1974-2008) », *Sociologie*, vol. Vol. 10, n° 2, p. 131-151, juill. 2019.
- CE Delft, « Taxes in the field of aviation and their impact : final report. », juin 06, 2019. <http://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/0b1c6cdd-88d3-11e9-9369-01aa75ed71a1> (consulté le avr. 13, 2021).
- Etude Fondapol, Après le Covid-19, le transport aérien en Europe : le temps de la décision : <https://www.fondapol.org/etude/apres-le-covid-19-le-transport-aerien-en-europe-le-temps-de-la-decision-2/>
- The Shift Project, Pourquoi voler en 2050 ?, 2021, p132

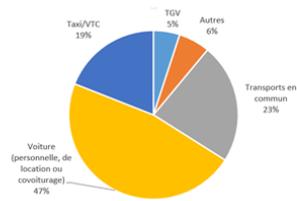
# Fiche 3 : Intermodalité et modes de transport alternatifs

Fiche levier

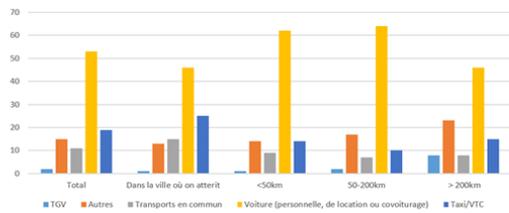
## Intermodalité et modes de transport alternatifs

### DESCRIPTION

Des trajets depuis et vers les aéroports qui se font majoritairement en voiture

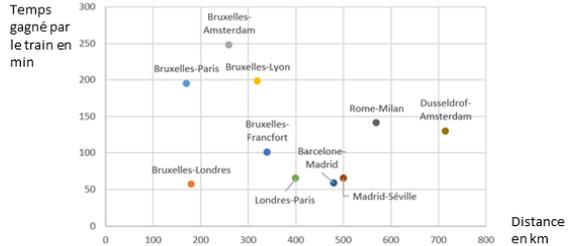


Part des différents moyens de transport qui permettent de se rendre à l'aéroport. Source : DGAC 2015 sur les passagers des aéroports français



Part des différents moyens de transport pour quitter l'aéroport en fonction de la destination finale. Source : DGAC 2015 sur les passagers des aéroports français

Le train : un mode de transport qui permet parfois de se déplacer plus rapidement que l'avion



Temps de trajet gagné entre le train et l'avion sur certains trajets européens en min en fonction de la distance à vol d'oiseau en km. Source : Go Euro

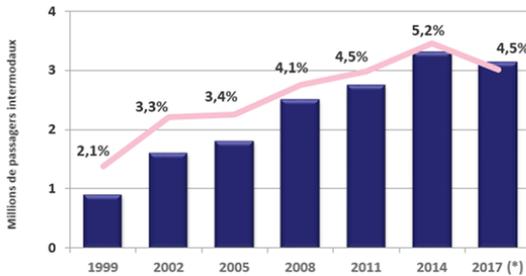


Carte de France selon la distance en temps depuis Paris en TGV. Source : L'Express, 2018

Il faut cependant préciser que le train n'est une alternative viable que pour les trajets de moins de 800km pour les trains de jour et de moins de 1500km pour les trains de nuit

### RETROSPECTIVE

Une intermodalité qui se développe progressivement



Part des passagers à l'arrivée de CDG empruntant le train à la gare TGV à Paris CDG en intermodalité. Source : DGAC

L'installation de lignes TGV concurrence l'aviation



Evolution des parts modales pour des voyages entre Berlin et Munich avant et après la mise en place d'une ligne de train à grande vitesse. Source : Deutsche Bahn 2018, 6T

Des trains de nuit qui ont quasiment disparu en France



Evolution de la desserte en train de nuit en France entre 1980 et aujourd'hui. Source : France Info

**Etude 6T (2019) :** Une étude qualitative menée par le bureau d'étude sociologique 6T montrent que es voyageurs raisonnent en termes de **temps porte à porte**. Lorsque l'aéroport de départ ou d'arrivée est mal desservi ou que les contrôles sont perçus comme trop long, l'usager peut **choisir le train malgré un surcoût**.

Le développement des trajets en cars après la libéralisation du secteur en 2015 peut également concurrencé l'avion notamment sur certains trajets européens ou domestiques.

TENDANCE

Une tendance post-covid : le report modal vers le train pour des raisons environnementales

Etude UBS Investment Bank, 2020

« By train or by plane ? » Traveller's dilemma after Covid-19, amid climate change concerns

L'étude estime que le train sera bientôt davantage choisi dans les arbitrages avion/train pour les trajets où l'alternative ferroviaire est pertinente.

Les deux critères principaux de cet arbitrage sont la fréquence et le prix. Selon l'enquête, les passagers accepteront de faire jusqu'à 5 ou 6h de trajet en train pour des voyages personnels et 4h pour des voyages d'affaires.

Soutenue par une tendance de fond

33% des français affirmaient faire un choix « influencé par l'aspect environnemental » lorsque la destination qu'ils rejoignaient était à la fois desservie par le train et l'avion (DGAC, 2014)



Le potentiel de report modal dépend fortement du type de trajet et de sa durée. Il faut également prendre en compte les questions de dissonance cognitive (dissociation des déclarations et des pratiques). Cf Fiche sur l'évolution des besoins

Une tendance plus ou moins prise en compte par les pouvoirs publics

Proposition de la Convention Citoyenne pour le Climat :

« Organiser progressivement la fin du trafic aérien sur les vols intérieurs d'ici 2025, uniquement sur les lignes où il existe une alternative bas carbone satisfaisante en prix et en temps »

Projet de loi Climat et Résilience: « Sont interdits, [...] toutes les liaisons aériennes à l'intérieur du territoire français dont le trajet est également assuré par les voies du réseau ferré national sans correspondance et par plusieurs liaisons quotidiennes de moins de deux heures trente. »

Liaisons concernées : Paris-Nantes / Paris – Bordeaux / Paris - Lyon

2 462 628 passagers en 2019 (DGAC)

15% du trafic radial (Paris – Province)

9% du trafic aérien à l'intérieur de la métropole



L'ensemble de ce trafic ne sera pas supprimé. En effet, les vols qui permettent les correspondances seront conservés. Un voyageur effectuant un voyage Bordeaux-Dubaï avec une correspondance à Paris pourra toujours prendre un avion Bordeaux-Paris.

PROSPECTIVE

Les scénarios du secteur utilisent assez peu ces leviers de décarbonation

Dans les scénarios traitant spécifiquement du transport aérien, il y a encore peu d'hypothèses portant spécifiquement sur le déploiement d'autres transports alternatifs.

- Scénario IEA – 2020 et Scénario ICSA – 2019 : encouragement et promotion de modes de transports alternatifs à l'avion
- Scénario ONERA - 2010 : développement des trains à propulsion électrique et des bateaux à voiles très larges.

Les questions de l'intermodalité ne sont pas non plus évoquées.

D'autres scénarios plus globaux de décarbonation de la société française encouragent la substitution de l'avion par le train.

Scénario Négawatt : « Les liaisons ferroviaires doivent également permettre une disparition progressive des vols aériens intérieurs, en priorité pour tous les déplacements inférieurs à 800 km ».

Scénario ADEME Vision Energie Climat 2030-2050 : de nombreuses familles font le choix de substituer l'avion par le train dès que c'est possible, notamment pour leur départ en vacances. L'utilisation de ce dernier est réduite aux transports lointains pour les vacances et réduit à une fois par an la plupart du temps.

On peut souligner ici qu'il s'agit d'un sujet qui est d'une manière générale très peu abordé, que ce soit dans les scénarios du secteur ou dans des scénarios plus globaux

Exemple d'une solution possible : Le redéploiement des trains de nuits

Objectif : encourager le rapport modal vers le train des :

- 49% de passagers aériens français qui ont voyagé vers des destinations atteignables en train de nuit (France métropolitaine, pays limitrophes, Pays-Bas, Autriche, Danemark, Royaume-Uni) ;
- 60,7 millions de touristes provenant d'Espagne, Italie, Belgique, Luxembourg, Allemagne, Pays-Bas, Royaume-Unis et Suisse en 2017 (à noter que tous ceux-ci n'ont pas pris l'avion pour venir en France).



Proposition du collectif Oui au Train de Nuit, vision 2030

Il faut tout de même noter que cette solution comporte aussi des inconvénients, comme souligné dans une étude récente d'Eurocontrol avec notamment un coût de déploiement élevé sur une temporalité longue qui nécessiterait un effort financier important de la part des états.

## REFERENCES



- IEA, « Energy Technology Perspectives 2020 », IEA
- ICSA, « Envisioning a “zero climate impact” international aviation pathway towards 2050: how governments and the aviation industry can step-up amidst the climate emergency for a sustainable aviation future », p. 15, 2019
- Onera, « Transport aérien 2050 - Des recherches pour préparer l'avenir », 2010
- Enquête national des passagers aériens, DGAC, 2015
- Statistiques du trafic aérien commercial, DGAC, 2020
- Chiffres Clés du tourisme, édition 2018, DGE
- Enquête GoEuro menée en 2016, résultats disponibles sur : [https://www.classtourisme.com/Train-ou-avion-Go-Euro-compare-la-rapidite\\_a1151.html](https://www.classtourisme.com/Train-ou-avion-Go-Euro-compare-la-rapidite_a1151.html)
- Collectif Oui au train de nuit : <https://ouiautraindenuit.wordpress.com/>
- Enquête sur la complémentarité modale train/avion, DGAC, 2015
- Propositions de la Convention Citoyenne pour le Climat pour limiter les effets néfastes du transport aérien – 2020 : <https://propositions.conventioncitoyennepourleclimat.fr/objectif/limiter-les-effets-nefastes-du-transport-aerien/>
- Projet de loi Climat, adopté le 4 mai 2021 : [https://www.assemblee-nationale.fr/dyn/15/textes/l15b3875\\_projet-loi](https://www.assemblee-nationale.fr/dyn/15/textes/l15b3875_projet-loi)
- Scénario Négawatt 2017-2050 : <https://negawatt.org/Scenario-negaWatt-2017-2050>
- Scénario Ademe, Visions énergie climat 2030/2050 : quels modes de vie pour demain ?
- USB Investment Bank, 2020 : « By train or by plane ? » Traveller's dilemma after COVID-19, amid climate change concerns
- DGAC, 2014 : Image du transport aérien en France en 2013
- Comprendre les choix et l'expériences de voyageurs en matière de déplacements interurbains, Etude 6T pour AQT, 2019
- « Plane and Train : getting the balance right » - Eurocontrol Think Papers – 3 juin 2021

## Fiche 4 : Efficacité énergétique et renouvellement des flottes

Fiche levier

### Efficacité énergétique et renouvellement des flottes

#### DESCRIPTION

L'efficacité énergétique d'un avion correspond à sa capacité à consommer le moins d'énergie possible pour une distance donnée. Son amélioration est en particulier liée à des progrès techniques, qui sont intégrés opérationnellement de la manière suivante :

R&D

Amélioration technique de l'efficacité énergétique de l'avion

Intégration de l'amélioration aux nouveaux avions construits

Renouvellement des flottes avec des avions intégrant l'amélioration

Le renouvellement des flottes est donc une opération permettant d'améliorer l'efficacité énergétique des flottes en service. Le rétrofit des appareils en services, bien que possible, est une pratique peu courante.

#### 4 leviers d'améliorations techniques

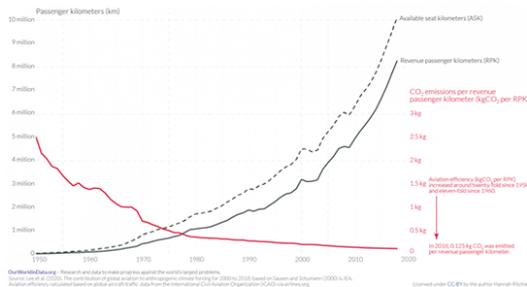
- Alléger la masse des avions
- Optimiser la forme des avions
- Améliorer l'efficacité des moteurs et augmenter le taux de dilution
- Optimiser la gestion de l'énergie embarquée

Selon le Gifas (Groupement des Industries Françaises Aéronautiques et Spatiales), la nouvelle génération d'avions aura un **gain de consommation d'énergie de 20% à 30%** par rapport à la génération actuelle.



Remplacer tous les avions actuellement en service par ceux de la dernière génération disponible (qui représentent seulement 12% des avions actuels) permettrait une baisse des émissions de l'ordre de **15 à 20%**, mais le renouvellement des flottes est une **démarche très onéreuse** qui doit être étalée sur plusieurs années.

#### RETROSPECTIVE



Évolution des du trafic aérien mondial (en noir) et des émissions par passagers-kilomètres payants (en rouge) (Our World in Data, 2020)



L'OACI (Organisation de l'Aviation Civile Internationale) a produit des normes et des réglementations concernant les **émissions de GES et de polluants atmosphériques** par les avions.

Les appareils sont **aujourd'hui 85% plus efficaces** du point de vue énergétique **que dans les années 1960**

Depuis une vingtaine d'année, les émissions de CO<sub>2</sub> du secteur et le trafic ont subi une **décorrélation progressive** (voir figure de gauche).

La **raison principale** de cette décorrélation est l'**amélioration de l'efficacité énergétique** des avions en service (les autres raisons étant notamment l'augmentation des taux de remplissage des cabines et la densification de celles-ci).

Les **objectifs environnementaux fixés par l'OACI** visent une **amélioration annuelle de l'efficacité énergétique** des aéronefs (mesurée en carburant consommé par passager et par kilomètre) de **2% jusqu'en 2050**.

#### TENDANCE

Les **progrès en termes d'efficacité énergétique des appareils atteignent une asymptote** (Shift Projet et Supaéro Décarbo, 2020), et il devient en plus en plus difficile et coûteux de générer de tels progrès (T&E, 2018). L'efficacité de la flotte mondiale s'améliore néanmoins grâce au remplacement des appareils anciens par les modèles les plus récents. Le **rythme actuel de renouvellement des flottes est de 25 ans** (Shift Projet et Supaéro Décarbo, 2020).



Le plan de relance de **1,5 Mds €** à la R&D aéronautique a également pour objectif de **permettre un renouvellement des flottes** avec des appareils commerciaux **plus efficaces énergétiquement**. Le développement par l'industrie aéronautique française d'une nouvelle génération d'appareil plus efficace énergétiquement constitue un **levier décarbonation de la flotte mondiale** compte tenu notamment du leadership mondial d'Airbus et Safran sur les appareils court-et moyen-courriers et leurs moteurs.

## PROSPECTIVE



## Amélioration de l'efficacité énergétique

Waypoint 2050 - ATAG – 2020	Jusqu'à 42% de contribution à l'atteinte de l'objectif d'émissions de GES de l'industrie en 2050
Environmental Trends in Aviation to 2050 – OACI – 2019	1% par an en moyenne jusqu'en 2050 ( <i>scénario le plus optimiste</i> )
Energy Technology Perspectives 2020 – IEA – 2020	2,2% par an jusqu'en 2030
Zéro Climate Impact international aviation pathway towards 2050 - ICSA – 2019	2,5% par an jusqu'en 2050 nécessaires pour respecter les Accords de Paris
The global scale, distribution and growth of aviation: Implications for climate change - Gössling et Humpe – 2020	1% par an en moyenne jusqu'en 2050
Roadmap to decarbonising European aviation – Transport & Environment – 2018	0,9% par an jusqu'en 2050 soit 41% de baisse de consommation par rapport à 2010
Net Zero Technical Report – Committee on Climate Change – 2019	0,9% par an jusqu'en 2050

## Synthèse

- Selon l'étude de l'ICSA, une amélioration de l'efficacité énergétique des avions de **2,5% par an** jusqu'en 2050 est nécessaire **pour respecter les Accords de Paris**.
- L'**objectif** actuel de l'OACI fixé pour l'industrie est de **2% par an**.
- La **plupart des études** jugent plus probable une amélioration **autour de 1% par an** jusqu'en 2050.

## REFERENCES



- « Aviation – Analysis », IEA. <https://www.iea.org/reports/aviation>
- D. S. Lee et al., « The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018 », Atmospheric Environment, vol. 244, p. 117834, janv. 2021, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.117834.
- The Shift Project et Supaero Decarbo, « Pouvoir voler en 2050 : Quelle aviation dans un monde contraint », mars 2021. [https://theshiftproject.org/wp-content/uploads/2021/03/Pouvoir-voler-en-2050\\_ShiftProject\\_Rapport-2021.pdf](https://theshiftproject.org/wp-content/uploads/2021/03/Pouvoir-voler-en-2050_ShiftProject_Rapport-2021.pdf)
- T&E, « Roadmap to decarbonising European aviation », 2018. [https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/2018\\_10\\_Aviation\\_decarbonisation\\_paper\\_final.pdf](https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/2018_10_Aviation_decarbonisation_paper_final.pdf)
- République Française, « Plan de soutien à l'aéronautique - Pour une industrie verte et compétitive - Dossier de presse », 2020. [En ligne]. Disponible sur: [https://minefi.hosting.augure.com/Augure\\_Minefi/r/ContenuEnLigne/Download?id=94C9F4D9-0CB4-4D85-9026-7801E5E7F1E7&filename=2196%20DP%20-%20Plan%20de%20soutien%20C3%A0%20%27a%C3%A9ronautique.pdf](https://minefi.hosting.augure.com/Augure_Minefi/r/ContenuEnLigne/Download?id=94C9F4D9-0CB4-4D85-9026-7801E5E7F1E7&filename=2196%20DP%20-%20Plan%20de%20soutien%20C3%A0%20%27a%C3%A9ronautique.pdf)
- Our World In Data, « Climate change and flying: what share of global CO2 emissions come from aviation? », 2020. <https://ourworldindata.org/co2-emissions-from-aviation>

## Fiche 5 : Amélioration des opérations

Fiche levier

### Amélioration des opérations

#### DESCRIPTION

Les opérations au sol et en vol peuvent être optimisées, ce qui peut entraîner une réduction des émissions de CO2 actuelles du secteur.



	Opérations au sol	Opérations en vol
Exploitation	<ul style="list-style-type: none"> <li>Limitation de l'utilisation de moteurs auxiliaires de puissance (APU) pendant le roulage et le stationnement, élec</li> <li>Réduction des temps d'attente et de roulage grâce à l'amélioration de la gestion du trafic</li> <li>Electrification de la climatisation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Eco-pilotage (descentes continues, relèvement des altitudes d'arrivée...)</li> <li>Organisation de la circulation aérienne</li> <li>Limitation du fuel tankering*</li> <li>Vol en formation</li> <li>Réduction du poids des avions (catering)</li> </ul>
Technique	<ul style="list-style-type: none"> <li>Modification de l'architecture des aéroports pour diminuer les temps de roulage des appareils</li> <li>Décarbonation des engins de pistes et des équipements au sol, taxiage autonome électrique</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Efficacité énergétique (<i>amélioration moteur, modifications du profil des avions, etc. cf fiche dédiée</i>)</li> </ul>

\*Fuel tankering : pratique consistant à embarquer plus de carburant que nécessaire pour un vol afin d'éviter ou de limiter le refueling à l'aéroport d'arrivée.

#### RETROSPECTIVE

Ces améliorations ont été encouragées par les normes et réglementations fixées par l'Organisation de l'Aviation Civile Internationale (OACI), et par le Comité de la Protection de l'Environnement en Aviation (CAEP) et les opérations en vol sont aujourd'hui largement optimisées. Les marges de progrès sont donc limitées.



Les compagnies optimisent de manière historique les trajectoires des vols pour augmenter leur rentabilité. Les trajectoires actuelles sont donc déjà quasiment optimales.

La mise en place opérationnelle le 16 novembre 2010 des concepts Collaborative Decision Making (CDM) sur l'aéroport de Paris Charles de Gaulle aurait permis de réduire de 10% les temps de roulage. Ce dispositif est aussi présent sur l'aéroport d'Orly. Il ne se justifie pas sur de petites plateformes où les temps de roulage sont courts, si le temps de roulage incompressible représente la quasi-totalité de celui-ci et si la gestion est limitée (*Groupe ADP*).

Les plus grands aéroports :

- Incitent les compagnies à limiter l'utilisation des APU ;
- Sont en train de décarboner leur flottes de véhicules au sol et les équipements au sol
- Sont en train d'électrifier les postes de stationnement des avions.

#### TENDANCE

Le ciel européen est géré par une mosaïque de 9 centres de gestion de trafic.

- Allongement de route
- Discontinuité de trajectoire



Présentation des 9 FAB. Source : MTE5, 2011.

#### L'initiative « Single European Sky »

Etablissement de règles communes et d'une coopération entre les centres de contrôle pour créer un espace aérien commun.

Intérêts

- Fluidifier le trafic
- Réduire les temps de parcours
- Economies de carburant

Cette réforme du ciel unique européen doit être mise en place dès que possible, et pourrait, en conjonction avec l'accélération de la mise en œuvre des autres solutions d'amélioration des opérations (les solutions ESAR), faire baisser les émissions actuelles de GES de l'ordre de 10% selon le secteur (*EUROCONTROL, 2021*).



PROSPECTIVE



Amélioration des opérations

Waypoint 2050 - ATAG - 2020 (scénario pessimiste / medium / optimiste)

0/3/6% de gains en 2050 par rapport au scénario de référence ou encore 0/0,1/0,2% par an

Environmental Trends in Aviation to 2050 – OACI – 2019

0,39% par an (*scénario le plus optimiste*)

Carbon road-map : a path to net zero – Sustainable aviation UK – 2020

4% de gain d'émissions en 2050 par rapport au scénario de référence

Destination 2050 – A4E, ACI Europe, ASD, ERA, et CANSO – 2021

5-6% de gain d'émissions en 2050 par rapport au scénario de référence (*les mesures les plus importantes étant relatives à l'amélioration de la gestion du trafic aérien*)

Roadmap to decarbonising European Aviation – T&E - 2018

0,2% par an

Synthèse

- Quasiment toutes les études de prospective citent **l'amélioration des opérations comme un levier de décarbonation** de l'industrie, exemples à l'appui.
- **Le détail** entre les opérations au sol et en vol en termes de contribution **n'est pas toujours donné**.
- De la même façon, les gains en termes d'émissions liées à l'amélioration des émissions ne sont pas toujours distingués de ceux liés à l'amélioration de l'efficacité énergétique des flottes.
- Cette contribution tourne **autour de 5% de gains d'émissions en 2050**, et reste donc **relativement faible** par rapport à d'autres leviers.

REFERENCES



- The Shift Project et Supaero Decarbo, « Pouvoir voler en 2050 : Quelle aviation dans un monde contraint », mars 2021. Consulté le: avr. 03, 2021, [https://theshiftproject.org/wp-content/uploads/2021/03/Pouvoir-voler-en-2050\\_ShiftProject\\_Rapport-2021.pdf](https://theshiftproject.org/wp-content/uploads/2021/03/Pouvoir-voler-en-2050_ShiftProject_Rapport-2021.pdf)
- GAC, « Rapport Environnement DGAC 2019 », 2020, [https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Rapport\\_Environnement\\_DGAC\\_2019.pdf](https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Rapport_Environnement_DGAC_2019.pdf)
- « Comité de la Protection de l'Environnement en aviation (CAEP) », [https://www.icao.int/environmental-protection/pages/fr/caep\\_fr.aspx](https://www.icao.int/environmental-protection/pages/fr/caep_fr.aspx)
- T. LALAUURIE, « Ciel unique européen : pour une gestion du trafic aérien plus durable et plus résiliente », *France - European Commission*, 2020, [https://ec.europa.eu/france/news/20200922/modernisation\\_ciel\\_unique\\_europeen\\_fr](https://ec.europa.eu/france/news/20200922/modernisation_ciel_unique_europeen_fr)
- Air France, « Air France Développement durable : L'Essentiel 2019 », 2019, [https://corporate.airfrance.com/sites/default/files/2019\\_-\\_1csr\\_factsheet\\_af\\_fr\\_0.pdf](https://corporate.airfrance.com/sites/default/files/2019_-_1csr_factsheet_af_fr_0.pdf)
- « Ensemble, s'engager pour les enjeux de demain - ADP ». Consulté le: mars 23, 2021, [https://www.parisaeroport.fr/docs/default-source/groupe-fichiers/rse/adp\\_dd\\_pap.pdf?sfvrsn=61e1f4bd\\_8](https://www.parisaeroport.fr/docs/default-source/groupe-fichiers/rse/adp_dd_pap.pdf?sfvrsn=61e1f4bd_8)
- MTES, « Le ciel unique européen », 2011, [https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Ciel\\_unique\\_europeen\\_-2.pdf](https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Ciel_unique_europeen_-2.pdf)
- EUROCONTROL, « Think Paper #10 », 2021, <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2021-04/eurocontrol-think-paper-10-perfect-green-flight.pdf>
- Groupe ADP, Portail CDM, <https://www.cdmparis.net/Pages/PARIS-CHARLES%20DE%20GAULLE.aspx>

## Fiche 6 : Carburants Aériens Durables

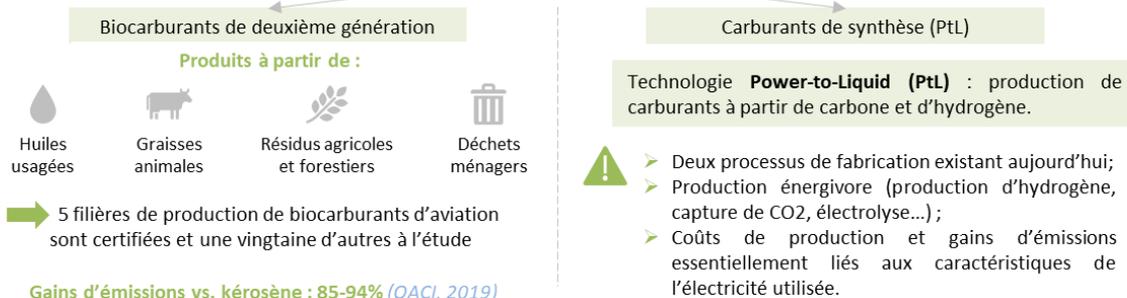
Fiche levier

### Carburants Aériens Durables (CAD)

#### DESCRIPTION

Les émissions de CO<sub>2</sub> du secteur de l'aérien sont quasi-exclusivement liées aux consommations de kérosène.

Les CAD : une alternative prometteuse



Les carburants sont dits « **drop-in** » : ils peuvent être utilisés pour les avions actuels **immédiatement jusqu'à 50% d'incorporation**. Des projets de R&D, financés par le Plan de Relance, sont en cours pour porter ce pourcentage à 100%

#### RETROSPECTIVE

Plus de 300 000 vols dans le monde ont utilisé des CAD depuis 2016 (IATA, 2020).

Des CAD dont la production est en cours de développement

Type de carburants	Produits à partir de	Stade d'avancement	Projets / Centrale
Biocarburants 2G	Huiles de cuisson usagées et résidus de graisse animale	Industrialisation en cours	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La Mède et Oudalle (Total – 2021)</li> <li>• Grandpuits (Total – 2024 – 170 kt/an, dont 60 à 70% de 2G)</li> </ul>
Biocarburants 2G	Résidus agricoles et forestiers	En cours de développement	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ISOPROD (résidus betteraviers)</li> <li>• REWOFUEL (résidus forestiers)</li> <li>• Futurol (tous types de biomasse – en cours de commercialisation)</li> <li>• BioTFuel (fin en 2021)</li> </ul>
PTL	CO <sub>2</sub> capturé directement dans l'air	En cours de développement	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1<sup>ère</sup> usine d'Europe en Norvège à partir de 2023. (100 ML/an en 2026)</li> </ul>

#### TENDANCE

Une production de CAD aujourd'hui anecdotique mais qui devrait se développer dans les prochaines années grâce au soutien des pouvoirs publics

**Petits volumes actuels** : en 2019, les biocarburants représentaient 0,01% de la consommation aérienne mondiale (France24, 2020). La production mondiale de biokérosène ne devrait représenter que **1 à 3 milliards de litres d'ici 2025**, soit 1% de la consommation (OSFME, 2020).



**Réglementation européenne** : le futur règlement européen ReFuelEU Aviation vise à faciliter le développement des CAD (CE, 2020). A noter que selon la directive RED II qui sera bientôt révisée, les biocarburants utilisant les huiles de cuisson usagées et certaines graisses animales ne devront pas dépasser une part de 1,7 % en 2030.



**Feuille de route française** : consommer au moins **2% de biocarburants de deuxième génération en 2025** et **5% en 2030**.



La place des biocarburants est prépondérante dans une grande quantité de scénarios...

Waypoint 2050 - ATAG - 2020 (scénario pessimiste / medium / optimiste)

Entre 235 et 450 Mt produites au niveau mondial en 2050.  
Pas de distinction entre les biocarburants et les PTL  
(*approche hybride*)

Net Zero by 2050 – IEA - 2021

Biocarburants : 45% de la demande mondiale  
PTL : 30% (*approche hybride*)

Destination 2050 – A4E, ACI Europe, ASD, ERA, et CANSO – 2021

6% de la demande européenne en 2030 (3.2 Mt), 83% en 2050 (32 Mt dont 60% de PTL) (*approche top-down*)

Roadmap to decarbonising European Aviation – T&E - 2018

Biocarburants : 11,4% de la demande européenne  
PTL : Tout le reste de la demande (*approche bottom-up*)

Carbon road-map : a path to net zero – Sustainable aviation UK – 2020

1 Mt de CAD en 2035, 4,5 Mt en 2050 (32% de la demande du Royaume-Uni). Pas de distinction entre les biocarburants et les PTL (*approche top-down*)

Net Zero Technical report – CCC - 2019

10% de CAD en 2050 (*approche top-down*)

Pouvoir voler en 2050 – Shift Project et Supaéro Décarbo - 2021

2,37 Mt de biocarburants et 4 Mt de PTL pour atteindre 100% de CAD en France en 2050 (*approche top-down*)

... mais d'autres scénarios sont moins optimistes. Par exemple, la **Fédération européenne pour le transport et l'environnement** descend jusqu'à seulement **11,4 % d'incorporation** de biocarburants avancés dans la consommation en 2050 (T&E, 2018).

Une production confrontée à des limites

Des biocarburants plus chers que les carburants conventionnels

Selon une méta-analyse menée dans le scénario Destination 2050, les biocarburants produits à partir d'huiles de cuisson usagées et de résidus de graisse animale sont de 2 à 2,8 plus chers que le kérosène actuel. Cette proportion monte à entre 1,9 et 9,4 pour les biocarburants produits à partir de résidus forestiers, et à entre 2,7 et 12,7 pour ceux issus de résidus agricole (Destination 2050, 2021).

Il est généralement considéré dans les scénarios que les **biocarburants coûtent 4 fois plus cher que le kérosène conventionnel**.

**La production de biocarburants de deuxième génération n'induit pas de pressions sur les terres disponibles** (contrairement à celle de carburants de première génération) puisque les carburants sont produits à partir de déchets et de résidus de culture. Les ressources nécessaires à leur production sont cependant par nature limitée.

Une production de PTL énergivore et chère qui induit une pression sur les terres disponibles

**La production de PTL est énergivore.** L'énergie électrique nécessaire pour produire 1kWh d'énergie sous forme de PTL (compression, capture de CO2, synthèse, transport, stockage et distribution) s'élève entre 2,8 et 4,6 kWh en fonction de si le CO2 est capturé à la sortie des usines ou directement dans l'air (Mc Kinsey, 2020).

**Pour produire 4Mt de PTL** (soit environ 50% de la consommation de kérosène des vols domestiques et internationaux en France en 2019 (DGAC, 2020)) **à partir d'électricité issue d'éolienne, il faudrait multiplier le parc éolien français par 5.** (Pouvoir voler en 2050, 2021). Produire suffisamment de PTL (et de H2) pour satisfaire 100% de la demande européenne de carburants en 2050 (avec 11,4% de biocarburants) conduirait à consommer 26% de la production électrique européenne de 2015 (T&E, 2018).

Le prix des carburants de synthèse (PTL) sont très dépendant du prix de l'électricité. Ils pourraient être de 2,3 à 6,4 plus chers que les carburants traditionnels (Destination 2050, 2021).

## REFERENCES

- IATA, Developing Sustainable Aviation Fuel (SAF), 2020. <https://www.iata.org/en/programs/environment/sustainable-aviation-fuels/>
- Total, Grandpuits : une plateforme zéro pétrole en 2024, 2020. <https://www.total.com/fr/expertise-energies/projets/bioenergies/grandpuits-biocarburants-bioplastiques>
- IFPEN, BioTfuel : première production de biocarburants avancés à partir de biomasse lignocellulosique sur les unités de démonstration, 2021.  
<https://www.ifpenouvelles.fr/article/biotfuelr-premiere-production-biocarburants-avances-partir-biomasse-lignocellulosique-les-unites-demonstration>
- Greenair, Europe's first power-to-liquid demo plant in Norway plans renewable aviation fuel production in 2023, 2020. <https://www.greenaironline.com/news.php?viewStory=2711>
- MTES, Biocarburants, 2021. <https://www.ecologie.gouv.fr/biocarburants>
- France24, Un premier vol long-courrier à l'huile de cuisson pour un avion d'Air France, 2021. <https://www.france24.com/fr/%C3%A9co-tech/20210518-un-premier-vol-long-courrier-%C3%A0-l-huile-de-cuisson-pour-un-avion-d-air-france>
- OSFME, « Perspectives d'évolution des biocarburants : Jeux des acteurs et enjeux fonciers », 2021. <https://www.iris-france.org/wp-content/uploads/2021/05/OSFME-R7-Perspectives-d%C3%A9volution-des-biocarburants.pdf>
- Commission Européenne, Carburants durables pour l'aviation — ReFuelEU Aviation, 2020. [https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/12303-Carburants-durables-pour-%E2%80%99aviation-ReFuelEU-Aviation\\_fr](https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/12303-Carburants-durables-pour-%E2%80%99aviation-ReFuelEU-Aviation_fr)
- Actu-environnement, L'avenir de l'industrie des biocarburants semé d'embûches, 2021. <https://www.actu-environnement.com/ae/news/industrie-biocarburants-green-deal-covid-19-avenir-observatoire-securite-flux-matiere-energetique-37525.php4>
- DGAC, « Les émissions gazeuses liées au trafic aérien en France en 2019 », 2020. [https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/bilan\\_emissions\\_gazeuses\\_2019.pdf](https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/bilan_emissions_gazeuses_2019.pdf)
- The Shift Project et Supaero Decarbo, « Pouvoir voler en 2050 : Quelle aviation dans un monde contraint », mars 2021. [https://theshiftproject.org/wp-content/uploads/2021/03/Pouvoir-voler-en-2050\\_ShiftProject\\_Rapport-2021.pdf](https://theshiftproject.org/wp-content/uploads/2021/03/Pouvoir-voler-en-2050_ShiftProject_Rapport-2021.pdf)
- ATAG, « Waypoint 2050 », 2020. [https://aviationbenefits.org/media/167187/w2050\\_full.pdf](https://aviationbenefits.org/media/167187/w2050_full.pdf)
- T&E, « Roadmap to decarbonising European aviation », 2018. [https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/2018\\_10\\_Aviation\\_decarbonisation\\_paper\\_final.pdf](https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/2018_10_Aviation_decarbonisation_paper_final.pdf)
- AE4, ACI Europe, ASD, ERA, et CANSO, « Destination 2050 », 2021. [https://www.destination2050.eu/wp-content/uploads/2021/03/Destination2050\\_Report.pdf](https://www.destination2050.eu/wp-content/uploads/2021/03/Destination2050_Report.pdf)
- Mc Kinsey pour le compte de Clean Sky et FCH, « Hydrogen-powered aviation - A fact-based study of hydrogen technology, economics, and climate impact by 2050 », 2020. [https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/FCH%20Docs/20200507\\_Hydrogen%20Powered%20Aviation%20report\\_FINAL%20web%20%28ID%208706035%29.pdf](https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/FCH%20Docs/20200507_Hydrogen%20Powered%20Aviation%20report_FINAL%20web%20%28ID%208706035%29.pdf)



## Fiche 7 : Hydrogène et électricité bas-carbone

Fiche levier

### Hydrogène et électricité bas-carbone

#### DESCRIPTION

L'utilisation d'hydrogène et d'électricité comme vecteurs énergétiques sont des pistes en cours d'étude de décarbonation du secteur aérien.



L'avion à propulsion **hydrogène**  
(ou « avion à hydrogène »)

L'avion à propulsion **électrique**  
(ou « avion électrique »)

Source d'énergie



➤ Hydrogène liquide produit à partir d'électricité bas-carbone

➤ Electricité bas-carbone

Contraintes techniques



➤ Nouvelle architecture d'avion  
➤ Volume d'hydrogène 4x et densité énergétique 3x supérieurs au kérosène  
➤ Sécurité et faisabilité technique

➤ Poids des batteries  
➤ Autonomie des batteries  
➤ Utilisation en hybridation seulement

Types de vols envisagés



➤ Court-courriers  
➤ Moyen-courriers

➤ Avions légers (commuters)  
➤ Vols régionaux en hybridation



➤ Pour ces deux technologies, le **pouvoir de décarbonation** de la source d'énergie vient du **contenu carbone de l'électricité utilisée**, l'hydrogène étant lui-même produit à partir d'électricité.  
➤ Le déploiement de ces deux technologies doit s'accompagner d'un développement des infrastructures associées pour l'acheminement, le stockage et la distribution de ces énergies.

#### RETROSPECTIVE

**Utilisation de l'hydrogène** : de nombreuses contraintes techniques à dépasser

La combustion d'hydrogène émet **plus de vapeur d'eau** que celle de kérosène, ce qui pourrait favoriser la **formation de trainées de condensation** à la sortie des réacteurs des avions. Ces trainées contribuent fortement au réchauffement climatique. La **quantification des bénéfices climatiques** liés au développement des avions à hydrogène **est un sujet recherche actuel**.

##### Enjeux

- ▲ **Explosivité** de l'hydrogène
- ▲ **Maintien** de la température à **-253°C**
- 💧 **Sécurisation des circuits** à haute altitude
- 🔧 **Masse et énergie des systèmes de réfrigération** permettant de conserver l'hydrogène sous forme liquide

Airbus a présenté **3 prototypes d'avion** à propulsion hydrogène en 2020. **Un de ces modèles est disruptif** et réinvente le profil actuel des aéronefs.



**Utilisation de l'électricité** : une utilisation inenvisageable actuellement pour les vols commerciaux de passagers

Le **volume et le poids des batteries** qu'il faudrait embarquer est actuellement un obstacle **insurmontable** pour un avion 100% électrique.

##### Hybridation

- **Sous 5 ans** pour avions de tourisme ou d'affaires à **10 pax maximum**
- **Horizon plus long pour les commuters** (moins de 19 pax), les **vols régionaux** (40 pax) et les **court et moyen-courriers**



L'hybridation consisterait surtout en une électrification des phases de montée et de descente.

**La fabrication de l'hydrogène liquide : un processus énergivore**

**1,7kWh**

Energie électrique nécessaire pour produire 1kWh d'énergie sous forme d'hydrogène liquide (électrolyse, transport, stockage et distribution) (Mc Kinsey, 2020)

TENDANCE

Des premiers avions commerciaux à propulsion hydrogène dès 2035 ?

 **Plan de relance de 1,5 Mds € à la R&D** aéronautique en 2020 suite à la crise du Covid, avec pour condition le **lancement d'un avion vert à hydrogène** d'ici 2035.

**L'industrie aéronautique arbitrera** entre les deux pistes de recherche possibles, les carburants aériens durables et l'avion à hydrogène, en 2025.

Dans tous les cas, **l'avion à hydrogène** devrait rester **circonscrit à des vols moyen-courriers**, les **vols long courriers** étant plus facilement envisageables avec des **carburants aériens durables**.

L'électricité comme moyen de propulsion pour d'autres aéronefs également

La technologie électrique est envisagée pour **d'autres types d'aéronefs** que les avions « classiques », **pour des vols très courts**.

Aéronefs eVTOL

- Réseau de **taxis volants**, entre 60 et 90 villes à **horizon 2035**
- Décollage et atterrissage **verticaux et électriques**
- **170 prototypes** à l'étude dans le monde
- Premières livraisons **avant 2025** (possibilité pour les JO de Paris 2024)



PROSPECTIVE

	Avion à propulsion hydrogène	Avion hybride
Pouvoir voler en 2050 – Shift Projet et Supaero Decarbo – 2021	A partir de 2035/2040 (100% de la flotte court et moyen-courriers en 2050/2055)	A partir de 2030/2035 (avions régionaux et commuters)
Net Zero Technical Report – Committee on Climate Change – 2019	Oui	A partir de 2040
Transport aérien 2050 : Des recherches pour préparer l'avenir – ONERA	Oui	Oui
Destination 2050 – A4E, ACI Europe, ASD, ERA, et CANSO – 2021	A partir de 2035	A partir de 2035
Net Zero Europe – European Climate Foundation - 2018	Oui	A partir de 2040



La plupart des scénarios **valident la pertinence** de la tendance présentée plus haut :

- Les technologies d'avions à hydrogène et d'avions hybrides électriques **viennent en complément des carburants aériens durables** ;
- **L'avion à hydrogène** est une solution qui sera **disponible au mieux en 2035** pour les vols commerciaux de passagers court et **moyen-courriers** ;
- **Cette solution** mettra du temps à se diffuser à l'ensemble de la flotte mondiale (pour rappel, le rythme actuel de renouvellement des flottes est de 25 ans), **et ne permettra donc pas de répondre à l'urgence de baisser les émissions à court et moyen termes** ;
- La **production d'hydrogène étant énergivore**, la **diffusion de cette solution** à l'ensemble de la flotte française et/ou mondiale **nécessite des arbitrages en faveur du transport aérien** au détriment d'autres secteurs, notamment en ce qui concerne les usages des terres (conversion de terres pour la production d'énergies renouvelables) et de consommation des ressources énergétiques disponibles ;
- L'hydrogène décarbonée coûte aujourd'hui beaucoup plus cher que le kérosène. **Le développement de l'avion à hydrogène sera effectif si les coûts de production décroissent de manière importante dans les prochaines années (Roland Berger, 2020)**.
- **L'avion électrique** a un champ d'application **très limité** pour des **petites capacités** et **ne permettra de réduire les émissions du secteur que de manière marginale** ;
- **L'hybridation des commuters et des vols régionaux, court et moyen-courriers** est un **levier de décarbonation** qui pourrait **mature à moyen terme**.

## REFERENCES



- Révolution énergétique, « L'avion à hydrogène est une chimère ! », 2021. <https://www.revolution-energetique.com/lavion-a-hydrogene-est-une-chimere/>
- The Shift Project et Supaero Decarbo, « Pouvoir voler en 2050 : Quelle aviation dans un monde contraint », mars 2021. [https://theshiftproject.org/wp-content/uploads/2021/03/Pouvoir-voler-en-2050\\_ShiftProject\\_Rapport-2021.pdf](https://theshiftproject.org/wp-content/uploads/2021/03/Pouvoir-voler-en-2050_ShiftProject_Rapport-2021.pdf)
- B. Chevalier, « Paris : les premiers taxis volants en test dès cet été ! », Adentis, févr. 02, 2021. <https://www.adentis.fr/paris-les-premiers-taxis-volants-en-test-des-cet-ete/>
- Futura et Relaxnews, « Airbus dévoile trois avions qui seront propulsés à l'hydrogène », Futura, 2020. <https://www.futura-sciences.com/sciences/actualites/avion-airbus-devoile-trois-avions-seront-propulses-hydrogene-73099/>
- Supaero Decarbo, « ZEROe et le monde de demain », Fichier PDF. <https://www.fichier-pdf.fr/2020/09/24/zeroe-et-le-monde-de-demain/>
- Mc Kinsey pour le compte de Clean Sky et FCH, « Hydrogen-powered aviation - A fact-based study of hydrogen technology, economics, and climate impact by 2050 », 2020. [https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/FCH%20Docs/20200507\\_Hydrogen%20Powered%20Aviation%20report\\_FINAL%20web%20%28ID%208706035%29.pdf](https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/FCH%20Docs/20200507_Hydrogen%20Powered%20Aviation%20report_FINAL%20web%20%28ID%208706035%29.pdf)
- Roland Berger, « Hydrogen : A future fuel for aviation? », 2020. <https://www.rolandberger.com/en/Insights/Publications/Hydrogen-A-future-fuel-for-aviation.html>

## ANNEXE 4 – HYPOTHESES DETAILLEES DES SCENARIOS

Pour les hypothèses communes, si la case est blanche, alors l'hypothèse considérée est identique à celle dans la colonne « vols intérieurs » du S0. Si c'est le cas pour les autres hypothèses, alors l'hypothèse considérée est identique à celle dans la colonne « vols intérieurs » du scénario considéré.

Tableau 1 : Hypothèses détaillées des scénarios

Variable	Principales sources d'hypothèses	S0		SA		SB		SC	
		Vols intérieurs	Vols internationaux						
Part du trafic associé aux commuters en 2019	Calcul [16]	0,3 %	0,3 %	0,3 %	0,3 %	0,3 %	0,3 %	0,3 %	0,3 %
Part du trafic associé aux vols régionaux en 2019	Calcul [16]	1,0 %	1,0 %	1,0 %	1,0 %	1,0 %	1,0 %	1,0 %	1,0 %
Part du trafic associé aux vols CC en 2019	Calcul [16]	8,1 %	8,1 %	8,1 %	8,1 %	8,1 %	8,1 %	8,1 %	8,1 %
Part du trafic associé aux vols MC en 2019	[7]	34,4 %	34,4 %	34,4 %	34,4 %	34,4 %	34,4 %	34,4 %	34,4 %
Part du trafic associé aux vols LC en 2019	[7]	56,2 %	56,2 %	56,2 %	56,2 %	56,2 %	56,2 %	56,2 %	56,2 %
Evolution du trafic entre 2019 et 2020	[87]	-59,0 %	-59,0 %	-59,0 %	-59,0 %	-59,0 %	-59,0 %	-59,0 %	-59,0 %
Evolution du trafic entre 2019 et 2021	Scénario central (Europe) [178]	-56,0 %	-56,0 %	-56,0 %	-56,0 %	-56,0 %	-56,0 %	-56,0 %	-56,0 %
Evolution du trafic entre 2019 et 2022	Scénario central (Europe) [178]	-9,0 %	-9,0 %	-9,0 %	-9,0 %	-9,0 %	-9,0 %	-9,0 %	-9,0 %
Evolution du trafic entre 2019 et 2023	Scénario central (Europe) [178]	-5,0 %	-5,0 %	-5,0 %	-5,0 %	-5,0 %	-5,0 %	-5,0 %	-5,0 %
Evolution du trafic entre 2019 et 2024	Scénario central (Europe) [178]	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %
Date reprise du trafic suite à la crise sanitaire	Scénario central (Europe) [178]	2024	2024	2024	2024	2024	2024	2024	2024
Taux de croissance du trafic post-crise - 2030	DGAC	0,9 %	2,7 %	0,9 %	2,7 %	0,9 %	2,7 %	0,9 %	2,7 %
Taux de croissance du trafic 2031-2040	DGAC	1,4 %	2,7 %	1,4 %	2,7 %	1,4 %	2,7 %	1,4 %	2,7 %
Taux de croissance du trafic 2040-2050	DGAC	1,4 %	2,7 %	1,4 %	2,7 %	1,4 %	2,7 %	1,4 %	2,7 %
Elasticité du trafic par rapport au prix - CC (Moins de 2000 km)	[210]	-1,23	-1,12	-1,23	-1,12	-1,23	-1,12	-1,23	-1,12
Elasticité du trafic par rapport au prix - MC & LC	[210]	-0,84	-0,84	-0,84	-0,84	-0,84	-0,84	-0,84	-0,84

Scénario évolution prix du kérosène	[196]	Destination 2050							
Evolutions coûts des biocarburants vs. kérosène	[196]	Destination 2050							
Evolutions coûts des Electrocarburants vs. kérosène	[196]	Destination 2050							
Evolutions coûts de l'hydrogène vs. kérosène	[196]	Destination 2050							
Report de la hausse des coûts sur les billets 2022-2030		50 %	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %
Report de la hausse des coûts sur les billets 2031-2040		50 %	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %
Report de la hausse des coûts sur les billets 2041-2050		50 %	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %
Intensité carbone mix eiq France	I Care d'après [201] [106] et [171]	RTE N2							
Intensité carbone mix eiq - LH <sub>2</sub> ok	I Care d'après [202] [34] [106] et [171]		IEA WEO 21 - APS						
Intensité carbone mix eiq - PTL ok	I Care d'après [202] [34] [106] et [171]		IEA WEO 21 - APS						
Proportion des conso de kérosène couvertes par des Electrocarburants bas-carbone		70%	67%	70%	67%	70%	67%	70%	67%
Part de SAF produits en France		100%	50%	100%	50%	100%	50%	100%	50%
Part de LH <sub>2</sub> produit en France		100%	50%	100%	50%	100%	50%	100%	50%
Date de démarrage de la production indus. de Electrocarburants	[1][7][14][15]	2030	2030	2030	2030	2030	2030	2030	2030
Part de la prod. de Electrocarburants à partir de DACCS (vs. Capture directe)		0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Effets des mesures de réduction du trafic 2021 - CMC	DGAC	-2,3%	0,0%	-2,3%	0,0%	-2,3%	0,0%	-2,3%	0,0%
Effets des mesures de réduction du trafic 2023-2030 - CMC		0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	-5,0%	-5,0%	-1,0%	-1,0%
Effets des mesures de réduction du trafic 2031-2040 - CMC		0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	-2,5%	-2,5%	-1,0%	-1,0%
Effets des mesures de réduction du trafic 2041-2050 - CMC		0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	-1,0%	-1,0%	-1,0%	-1,0%
Effets des mesures de réduction du trafic 2021 - LC		-2,3%	0,0%	-2,3%	0,0%	-2,3%	0,0%	-2,3%	0,0%
Effets des mesures de réduction du trafic 2023-2030 - LC		0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	-4,0%	-4,0%	-1,0%	-1,0%

Effets des mesures de réduction du trafic 2031-2040 - LC		0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	-2,0%	-2,0%	-1,0%	-1,0%
Effets des mesures de réduction du trafic 2041-2050 - LC		0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	-1,0%	-1,0%	-1,0%	-1,0%
Taux de remplissage actuel	[86]	85%	82%	85%	82%	85%	82%	85%	82%
Taux de remplissage en 2030	[14]	89%	89%	89%	89%	92%	92%	90%	90%
Date commercialisation avion CMC à hydrogène	[16] [196] [97]	2040	2040	2035	2035	2040	2040	2040	2040
Proportion d'avions à LH <sub>2</sub> dans les nouveaux avions CMC à cette date		0%	0%	50%	50%	0%	0%	50%	50%
Proportion d'avions à LH <sub>2</sub> dans les nouveaux avions CMC en 2050		0%	0%	100%	100%	0%	0%	100%	100%
Gain de consommations d'énergie pour les avions CMC à hydrogène	[16] [196] [97]	0%	0%	20%	20%	0%	0%	15%	15%
Date apparition nouvelle génération d'avions CMC et LC à kérosène	[16] [196] [97]	2040	2040	2035	2035	2040	2040	2035	2035
Gain de consommations d'énergie pour la nouvelle génération d'avions à kérosène	[16] [196] [97]	0%	0%	30%	30%	20%	20%	25%	25%
Rythme de renouvellement des flottes	[16] [196] [97]	25	25	20	20	25	25	22,5	22,5
Gain associé à l'amélioration des opérations	[16] [196] [97]	0,10%	0,10%	0,35%	0,35%	0,20%	0,20%	0,20%	0,20%
Part des biocarburants dans le mix énergétique en 2030		0%	0%	5%	5%	5%	5%	5%	5%
Part des biocarburants dans le mix énergétique en 2040		0%	0%	21%	21%	23%	23%	20%	20%
Part des biocarburants dans le mix énergétique en 2050		0%	0%	28%	28%	50%	50%	29%	29%
Pouvoir décarbonant des biocarb en 2020	[16] [196] [97]	0%	0%	35%	35%	35%	35%	35%	35%
Pouvoir décarbonant des biocarb en 2030	[16] [196] [97]	0%	0%	35%	35%	35%	35%	35%	35%
Pouvoir décarbonant des biocarb en 2040	[16] [196] [97]	0%	0%	12%	12%	12%	12%	12%	12%
Pouvoir décarbonant des biocarb en 2050	[16] [196] [97]	0%	0%	5%	5%	12%	12%	12%	12%
Part des Electrocarburants dans le mix énergétique en 2030		0%	0%	1%	1%	1%	1%	1%	1%
Part des Electrocarburants dans le mix énergétique en 2040		0%	0%	21%	21%	23%	23%	12%	12%
Part des Electrocarburants dans le mix énergétique en 2050		0%	0%	53%	53%	50%	50%	35%	35%

## ANNEXE 5 – RESULTATS DETAILLES DE LA HIERARCHISATION DES ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX LIES AU SECTEUR AERIEN

Enjeux environnementaux liés au secteur aérien entre 2020 et 2050 – Périmètre « Départs et arrivées France »										
Enjeux environnementaux	Enjeux environnementaux Sous-catégories	Critère 1 Criticité actuelle		Critère 2 Tendance		Critère 3 Impact du secteur		Critère 4 Marge de Manœuvre		Niveau d'enjeu global
		Quel est le niveau de criticité actuelle de l'enjeu au regard de l'état initial ?		Quelle est la tendance actuellement observée ou projetée pour l'enjeu ?		Quelle est l'impact du secteur par rapport au reste de l'économie ?		Quelle est la marge de manœuvre du secteur sur l'enjeu ?		
Atténuer le changement climatique	Réduire les effets hors CO <sub>2</sub> : autres GES, traînées de condensation, aérosols.	Le changement climatique impacte déjà fortement les populations, notamment celles situées dans les pays les plus vulnérables. C'est également le cas en France. Selon le rapport de l'ONU [244], l'objectif de l'Accord de Paris est loin d'être atteint au niveau mondial, ce qui annonce des changements cataclysmiques		Les émissions mondiales de gaz à effet de serre augmentent de manière continue depuis la première révolution industrielle, et le réchauffement climatique devrait donc s'amplifier dans les prochaines décennies.		Responsable de 3 à 7% du forçage radiatif selon les études, le secteur aérien contribue fortement au réchauffement climatique.		Le secteur aérien dispose de nombreux leviers d'actions pour réduire son impact sur le forçage radiatif, que ce soit en limitant ses émissions de GES ou encore en limitant les autres impacts contribuant au dérèglement climatique (notamment les traînées de condensation)		Majeur
		Criticité globale forte	3	Dégradation	3	Impact fort	3	Levier d'action fort	3	Majeur
Qualité et artificialisation des sols & paysages	Artificialisation des sols - Préserver la qualité des sols	La préservation de la qualité des sols (structure et fertilité) est un enjeu fort pour le maintien des productions agricoles et le renouvellement des espaces forestiers. Selon l'ONU [244], un cinquième de la superficie terrestre est dégradée au niveau mondial.		L'Etat des Sols en France [245] souligne les principales inquiétudes relatives à l'évolution de la qualité des sols, bien que subsistent certaines incertitudes. De manière globale, la qualité des sols diminue dans le monde : entre 2000 et 2015 les tendances mondiales concernant la couverture terrestre ont indiqué une perte nette de terres naturelles et semi-naturelle selon [244]		Le secteur aérien a un impact fort sur la qualité des sols situés dans les emprises des aéroports. Cependant, les surfaces concernées sont relativement petites par rapport à la quantité totale de surfaces de sols dégradés dans le monde.  A noter que si le secteur décide de produire des biocarburants à partir de monocultures énergétiques dédiées comme le miscanthus, cela pourrait entraîner une forte augmentation de son impact sur la qualité des sols.  La production de l'électricité nécessaire à la production des PtL et de l'hydrogène contribuera positivement à l'artificialisation des sols, dans un contexte d'augmentation générale de la demande en électricité.		Les aéroports disposent de nombreux leviers pour améliorer la qualité des sols non artificialisés sur leur emprise.  Le secteur aérien ne maîtrise cependant pas l'emplacement des installations produisant l'électricité qu'il consommera indirectement via les PtL et l'hydrogène.		Important

		Criticité sectorisée forte	3	Dégradation	3	Impact moyen	2	Levier d'action modéré	2	Important
	Artificialisation des sols - Limiter la consommation d'espaces naturels agricoles et forestiers	La lutte contre l'artificialisation des espaces naturels, agricoles et forestiers est un enjeu important à l'échelle mondiale. En effet, ces surfaces ne cessent de reculer sous l'effet de l'artificialisation des sols. Cette artificialisation qui augmente a des répercussions directes sur la qualité de vie des citoyens mais aussi sur l'environnement.  C'est aussi le cas en France, principalement sur les espaces agricoles		La planète connaît une urbanisation en forte augmentation depuis plusieurs décennies.  En France, plusieurs dizaines de milliers d'hectares sont artificialisés chaque année selon [246]		Le secteur aérien a un impact fort sur la qualité des sols situés dans les emprises des aéroports. Cependant, les surfaces concernées sont relativement petites par rapport à la quantité totale de surfaces de sols dégradés dans le monde.  A noter que si le secteur décide de produire des biocarburants à partir de monocultures énergétiques dédiées comme le miscanthus, cela pourrait entraîner une forte augmentation de son impact sur la qualité des sols.  La production de l'électricité nécessaire à la production des PtL et de l'hydrogène contribuera positivement à l'artificialisation des sols, dans un contexte d'augmentation générale de la demande en électricité.		La maîtrise de l'extension des infrastructures aéroportuaires ainsi que de celles permettant d'accéder aux aéroports constitue un levier fort d'action pour le secteur aérien vis-à-vis de cet impact.  Le secteur aérien ne maîtrise cependant pas l'emplacement des installations produisant l'électricité qu'il consommera indirectement via les PtL et l'hydrogène.		Important
		Criticité sectorisée forte	3	Dégradation	3	Impact faible	1	Levier d'action modéré	2	Important
	Préserver la qualité paysagère	La qualité paysagère est une notion intégrée aux politiques publiques. Ceci permet de garantir une relative stabilité de la qualité paysagère dans le temps.		La qualité paysagère a tendance à s'améliorer en France sous l'effet des politiques publiques actuelles.		Le principal impact du secteur aérien est lié à la localisation et à la taille des emprises des aéroports qui peuvent diminuer la qualité paysagère locale. C'est aussi le cas des installations nécessaires à la production de l'électricité consommée par le secteur de manière indirecte via les PtL et l'hydrogène		La maîtrise de l'extension des infrastructures aéroportuaires ainsi que de celles permettant d'accéder aux aéroports constitue un levier fort d'action pour le secteur aérien vis-à-vis de cet impact.  Le secteur aérien ne maîtrise cependant pas l'emplacement des installations produisant l'électricité qu'il consommera indirectement via les PtL et l'hydrogène.		Modéré
		Criticité sectorisée maîtrisée	1	Amélioration	1	Impact faible	1	Levier d'action faible	1	Modéré
	Biodiversité	Préserver et renforcer la biodiversité et les services écosystémiques	La biodiversité décline à un rythme sans précédent en France et dans le monde. L'IPBES annonce en 2019 que près d'un million d'espèces animales et végétales sont menacées d'extinction : la "6ème extinction de masse".		Malgré les mesures existantes pour la protection des espaces remarquables et des espèces, la biodiversité devrait continuer à dégrader dans les prochaines années. 18% des espèces évaluées sont éteintes ou menacées en France		Le secteur aérien a un impact sur la biodiversité qui est faible par rapport à d'autres secteurs comme l'agriculture. Son impact pourrait augmenter notamment via l'artificialisation des terres liés à la production de l'électricité qu'il consommera indirectement via les PtL et l'hydrogène.		Le secteur aérien dispose de peu de leviers supplémentaires par rapport à aujourd'hui pour diminuer son impact sur la biodiversité.	

			au 1er février 2019, avec une disparition plus élevée dans les outre-mer qu'en métropole selon [247]	A noter que si le secteur décide de produire des biocarburants à partir de monocultures énergétiques dédiées comme le miscanthus, cela pourrait entraîner une forte augmentation de son impact biodiversité.						
		Criticité globale forte	3	Dégradation	3	Impact faible	1	Levier d'action faible	1	Important
Pollution de l'air	limiter les émissions de polluants atmosphériques et préserver la qualité de l'air extérieur	La France a récemment été condamnée par le Conseil d'Etat "pour ne pas avoir pris de mesures suffisantes contre la pollution de l'air" [248] . En effet, les seuils de pollution étaient toujours dépassés dans 9 zones. En 2016, plus de la moitié de la population mondiale a été exposée à des niveaux de particules fines dans l'air au moins 2,5 fois supérieurs aux recommandations de l'OMS selon l'ONU, ce qui a provoqué 4,2 millions de décès prématurés [244]		Selon le bilan de la qualité de l'air extérieur en France en 2020 [249], la qualité de l'air s'améliore en France, grâce à la réduction des émissions de polluants. Selon l'ONU [244], la moitié de la population mondiale a été soumise à une détérioration de la qualité de l'air entre 2010 et 2016. La chute de certains polluants atmosphériques liés au COVID-19 ne semble être que temporaire avec des projections de pollutions à la hausse		Les vols ainsi que les accès aux aéroports sont à l'origine de nombreuses émissions locales de polluants atmosphériques.		Le secteur aérien dispose de quelques leviers pour diminuer la pollution de l'air à proximité des aéroports (recours aux CAD, gestion des accès...).		Important
		Criticité sectorisée modérée	2	Dégradation	3	Impact moyen	2	Levier d'action modéré	2	Important
Bruit	limiter les nuisances sonores	L'exposition au bruit a des impacts sur la santé humaine non négligeables. Il s'agit néanmoins d'un enjeu aujourd'hui très local à proximité des aéroports et dans les villes notamment. Près de 2,5 milliards de personnes dans le monde, soit une personne sur quatre, souffrira de déficience auditive à des degrés divers d'ici à 2050, avertit l'Organisation mondiale de la Santé [250]		La gestion des nuisances sonores tend globalement à s'améliorer en France grâce à la mobilisation d'outils réglementaires et normatifs appropriés (par exemple l'isolation sonore des logements autour des aéroports). En revanche au niveau mondial, si l'on ne fait rien d'ici 2050, au moins 700 millions personnes auront besoin de soins auriculaires et auditifs et d'autres services de réadaptation selon [250]. Cela s'explique notamment par l'augmentation de la première cause des nuisances sonores : l'augmentation du trafic routier.		Les nuisances sonores sont aujourd'hui localisées aux abords des aéroports et impactent les travailleurs du secteur et les riverains. L'impact des aéroports sur ces populations sont forts.		De nombreuses pistes d'améliorations des nuisances sonores sont recherchées : les constructeurs travaillent actuellement sur des moteurs moins bruyants, les centres de pilotages à une meilleure gestion des trajectoires...		Important

		Criticité sectorisée maîtrisée	1	Dégradation	3	Impact moyen	2	Levier d'action modéré	2	Important
Risques technologiques	limiter l'exposition des populations aux risques technologiques	L'exposition des populations aux risques technologiques est limitée en France, grâce à la mobilisation d'outils réglementaires et normatifs appropriés. Néanmoins, près de 40 000 accidents technologiques de tous niveaux de gravité, ont été recensés en France sur la période 1992-2017 selon [251]		La gestion des risques technologiques tend globalement à s'améliorer en France grâce à la mobilisation de nouveaux outils réglementaires et normatifs appropriés. Par ailleurs, seules des technologies certifiées selon les normes Française/Européennes étant utilisées dans notre étude, leur tendance vis-à-vis de cet enjeu est donc la seule pertinente à l'analyse.		Le secteur aérien a un impact limité sur ce sujet par rapport aux grandes entreprises industrielles.		Les activités liées à la mobilisation de nouvelles technologies (technologies de rupture, carburants alternatifs, structures disruptives) nécessitent un encadrement réglementaire et normatif permettant d'assurer un niveau de sécurité équivalent aux technologies existants.		Modéré
		Criticité ponctuelle modérée	1	Amélioration	1	Impact faible	1	Levier d'action faible	1	Modéré

## SIGLES ET ACRONYMES

AASQA	Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l’Air
ADEME	Agence de la Transition Ecologique
AFTM	Association Française du Travel Management
ACA	Airport Carbon Accreditation
ACI	Airport Council International
ACNUSA	Autorité de Contrôle des Nuisances Aéroportuaires
AIA	Aerospace Industries Association
AIC	Aircraft Induced Clouds
ANSP	Air Navigation Service Provider
APU	Groupe auxiliaire de puissance (Auxiliary Power Unit)
ASTM	American Society for Testing and Materials
ATAG	Groupe d'action du transport aérien (ou Air Transport Action Group)
ATECOPOL	ATELier d’ECOlogie POLitique
ATM	Air Traffic Management
ATR	Avions de Transport Régional
CAD/SAF	Carburants d’Aviation Durables (ou Sustainable Aviation Fuel – SAF)
CAEP	Comité de la Protection de l’Environnement en Aviation
CDM	Collaborative Decision Making
CITEPA	Centre Interprofessionnel Technique d’Etudes de la Pollution Atmosphérique
CORSIA	Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation
COV	Composés Organiques Volatils
CRJ	Canadair Regional Jet
DSNA	Direction des Services de la Navigation Aérienne
DGAC	Direction Générale de l’Aviation Civile
DGEC	Direction Générale de l’Énergie et du Climat
EASA	Agence de l’Union Européenne pour la Sécurité Aérienne
EGTS	Electric Green Taxiing System
ERF	Effective Radiative Forcing (ou Forçage Radiatif Effectif)
ETI	Entreprises de Taille Intermédiaire
ETP	Equivalent Temps Plein
EU ETS	European Union Emissions Trading System
GES	Gaz à Effet de Serre
GIFAS	Groupement des Industries Françaises Aéronautiques et Spatiales
GSE	Matériel de soutien au sol pour entretenir l’avion entre les vols (Ground Support Equipment)
IATA	Association du transport aérien international (ou International Air Transport Association)
ICSA	International Coalition for Sustainable Aviation
IDDDRI	Institut du Développement Durable et des Ressources Internationales
IRAP	Institut de Recherche en Astrophysique et Planétologie
LAET	Laboratoire Aménagement Economie Transports
LEAP	Leading Edge Aviation Propulsion
LGV	Ligne à Grande Vitesse
LTAG	Long Term Aspirational Goals
LTECV	Loi de Transition Energétique pour la Croissance Verte
LTO	Landing and Take-Off
MRO	Maintenance, Réparation et Révision
MTE	Ministère de la Transition Ecologique
NOx	Oxydes d’Azote

OACI / ICAO	Organisation de l'Aviation Civile Internationale (ou ICAO : International Civil Aviation Organization)
ONERA	Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales
ONG	Organisation Non Gouvernementale
PEB	Plans d'Exposition au Bruit
PGS	Plans de Gêne Sonore
PIB	Produit Intérieur Brut
PIPAME	Pôle Interministériel de Prospective et d'Anticipation des Mutations Economiques
PKTeq	Passager-équivalent-Kilomètre-Transporté Unité permettant de quantifier la totalité du chargement (passager, fret et poste) avec l'équivalence entre 100kg de fret ou de poste et un passager
PME	Petites et Moyennes Entreprises
PPBE	Plan de Prévention du Bruit dans l'Environnement
PtL	Power-to-Liquid ou électrocarburant (carburant de synthèse fabriqué à partir d'électricité)
RF	Forçage Radiatif
ROIC	Retour sur l'investissement en capital
RPK	Revenue Passenger Kilometer Somme des produits obtenus en multipliant le nombre de passagers payants transportés sur chaque étape par la longueur de l'étape. Cette somme correspond au nombre total de kilomètres parcourus par l'ensemble des passagers.
TEP	Tonne Equivalent Pétrole
TER	Transport Express Régional
TIACA	The International Air Cargo Association
TICFE	Taxe Intérieure sur la Consommation Finale d'Electricité
TLF	Transport et Logistique de France
TNSA	Taxe sur les Nuisances Sonores Aériennes
TSP	Particules totales en suspension
UAF & FA	Union des Aéroports Français et Francophones Associés
UE	Union Européenne
UTCATF	Utilisation des terres, changement d'affectation des terres et foresterie
SETI	Single Engine Taxi-In
SETO	Single Engine Taxi-Out
SNBC	Stratégie Nationale Bas-Carbone
SNTA	Stratégie National du Transport Aérien
STAR	Système de Traction des Avions au Roulage

## L'ADEME EN BREF

À l'ADEME - l'Agence de la transition écologique -, nous sommes résolument engagés dans la lutte contre le réchauffement climatique et la dégradation des ressources.

Sur tous les fronts, nous mobilisons les citoyens, les acteurs économiques et les territoires, leur donnons les moyens de progresser vers une société économe en ressources, plus sobre en carbone, plus juste et harmonieuse.

Dans tous les domaines - énergie, économie circulaire, alimentation, mobilité, qualité de l'air, adaptation au changement climatique, sols... - nous conseillons, facilitons et aidons au financement de nombreux projets, de la recherche jusqu'au partage des solutions.

À tous les niveaux, nous mettons nos capacités d'expertise et de prospective au service des politiques publiques.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle du ministère de la Transition écologique et du ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

### LES COLLECTIONS DE L'ADEME



#### FAITS ET CHIFFRES

L'ADEME référent : Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.



#### CLÉS POUR AGIR

L'ADEME facilitateur : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation.



#### ILS L'ONT FAIT

L'ADEME catalyseur : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.



#### EXPERTISES

L'ADEME expert : Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous son regard.



#### HORIZONS

L'ADEME tournée vers l'avenir : Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.



## Scénarios de transition écologique du secteur aérien

Dans le cadre de la présente étude, l'ADEME a étudié de manière objective et scientifique les leviers de décarbonation du transport aérien, et a élaboré trois scénarios contrastés, représentant trois stratégies potentielles de décarbonation de ce secteur pour la période 2020-2050.

L'ADEME a ensuite étudié de manière quantitative les impacts de ces scénarios en termes d'émissions de CO<sub>2</sub>, mais aussi de manière qualitative leurs impacts environnementaux et socio-économiques.

Cette étude s'est appuyée sur les connaissances disponibles auprès des parties prenantes du secteur (DGAC, compagnies aériennes, constructeurs, associations environnementales ...).

### *Essentiel à retenir*

La mobilisation des leviers de décarbonation peut permettre de réduire d'environ 75% les émissions de CO<sub>2</sub> du transport aérien entre 2019 et 2050. Les trois principaux leviers sont l'amélioration de l'efficacité énergétique des avions, le recours aux carburants durables et la maîtrise du trafic. Les deux premiers ne produiront des effets sensibles qu'à moyen et long terme, alors que le troisième pourrait être efficace à court terme.

