

Sept  
2022

  
**HORIZONS**

# Elaboration de scénarios de transition écologique du secteur aérien

---

**RAPPORT FINAL**

# REMERCIEMENTS

## Le comité de pilotage de l'étude

ADEME : José Caire, Maeva Tholance, Yann Tréméac, Stéphane Barbusse, Aurélien Bigo, Bertrand-Olivier Ducreux, Marc Cottignies, Romain Dewez, Gilles Aymoz, Antoine Pugliese, Aurélie Bichot, Nicolas Doré, Armelle de Bohan, Aïcha El Khamlichi, Jérémie Almosni, Aurélien Mornas, Céline Vachey, Samuel Puygrenier

DGEC : Frédéric Branger, Thibaud Chatillon, Isabelle Cabanne

DGAC : Nora Susbielle, Guillaume Van Reysel, Marc Dufresnoy, Kevin Guittet, Julien Lepoutre, Thierry Delort, Carine Donzel, Clément Maitre, Aymeric de Loubens

Groupement : Léo Genin, Adrien de Courcelles, Gala Sipsos, Marie Rebière et Margaux Jacob (I Care) ; Julie Chretien (6-t) ; Guillaume Cromer (ID-tourisme) ; Frederic Fiette, Robin Benevent et Gilles-Laurent Rayssac (Respublica Conseil) ; Alexandre Millet et Laurene Bel (Maartin)

## Le comité consultatif de l'étude

En addition des susdits, des membres et organisations suivantes ont été consultés dans le cadre d'un comité consultatif :

Claire Juillet et Frédéric Boone (ATECOPOL) ; Jean-Marc André (CITEPA) ; Laura Brimont et Mathieu Saujot (IDDRI) ; Florian Simatos, Hugo Mugnier, Jérôme Fontane, Scott Delbecq et Thomas Planès (ISAE Supaero) ; Yves Crozet (LAET) ; Grégoire Carpentier et Olivier Del Bucchia (Aero Decarbo).

# CITATION DE CE RAPPORT

I Care Environnement. 2022. Elaboration de scénarios de transition écologique du secteur aérien. 190 pages

Cet ouvrage est disponible en ligne <https://librairie.ademe.fr/>



Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Ce document est diffusé par l'ADEME

**ADEME**

20, avenue du Grésillé

BP 90 406 | 49004 Angers Cedex 01

Numéro de contrat : 2020MA000409

Étude réalisée pour le compte de l'ADEME par : I Care

Coordination technique - ADEME : Marc COTTIGNIES

Direction/Service : DVTD/STM

# SOMMAIRE

---

<b>SOMMAIRE.....</b>	<b>4</b>
<b>1. CONTEXTE, OBJECTIFS ET DEROULE DE L'ETUDE.....</b>	<b>11</b>
1.1. Contexte et objectifs de l'étude .....	11
1.2. Approche générale .....	13
1.3. Périmètre de l'étude.....	14
<b>2. LE SECTEUR AERIEN, UN SECTEUR CONFRONTE A DE NOMBREUX ENJEUX.....</b>	<b>16</b>
2.1. L'avion, un mode de transport en fort développement.....	16
2.1.1. Un vecteur de mondialisation en forte croissance .....	16
2.1.2. Les enjeux sociaux comme causes et conséquences du développement du secteur .....	23
2.1.3. Le fret aérien, un moyen de transport de marchandises à haute valeur ajoutée, urgentes ou périssables.....	26
2.1.4. L'aviation, un vecteur de mondialisation au service de la cohésion du territoire national et du développement économique des territoires périphériques en France.....	26
2.2. Un secteur bouleversé en 2019 par la pandémie de COVID-19 .....	27
2.2.1. Une forte baisse de l'activité aérienne entre 2019 et 2021.....	27
2.2.2. Une demande qui pourrait retrouver son niveau de 2019 en 2024 en Europe, et plus rapidement dans le reste du monde.....	29
2.2.3. Le plan de relance français, un plan massif de soutien assorti de conditions.....	31
2.3. Le secteur de l'aviation et le changement climatique .....	32
2.3.1. Un secteur à l'origine d'émissions importantes de GES, dont essentiellement du CO <sub>2</sub> .....	32
2.3.2. D'autres effets « hors CO <sub>2</sub> » qui augmentent encore la contribution du secteur aérien au changement climatique.....	40
2.4. Une part du trafic en compétition avec d'autres secteurs du transport .....	45
2.4.1. La place de l'aérien vis-à-vis des autres transports de voyageurs .....	45
2.4.2. Compétition du point de vue climatique .....	47
2.4.3. Une compétition sur d'autres critères.....	49
2.4.4. Le développement des trains de nuit et de l'intermodalité train-avion, deux solutions de lutte contre le changement climatique .....	50
2.5. Un secteur associé à d'autres impacts sur l'environnement.....	50
2.5.1. L'amélioration de la qualité de l'air sur les plateformes aéroportuaires, un objectif à poursuivre.....	51
2.5.2. Des plateformes aéroportuaires à l'origine d'importantes nuisances sonores .....	52
2.5.3. Les aéroports et la biodiversité.....	54
2.6. Un secteur économique dont certains acteurs sont confrontés à des enjeux de rentabilité.....	54
2.6.1. Une filière composée de nombreux acteurs et très concentrée mais qui repose également sur de très nombreux petits sous-traitants.....	55
2.6.2. Un secteur structuré par de grandes organisations .....	57
2.6.3. Des compagnies aériennes confrontées à des enjeux de rentabilité .....	60
2.6.4. Investissements économiques nécessaires à venir pour atteindre les objectifs du secteur .....	60
<b>3. UN SECTEUR QUI PEUT JOUER SUR DE NOMBREUX LEVIERS POUR SE DECARBONER .....</b>	<b>62</b>
3.1. L'équation de Kaya appliquée au secteur du transport aérien .....	62
3.2. La baisse de l'intensité carbone du mix énergétique.....	63
3.2.1. Les Carburants Aériens Durables .....	63
3.2.2. L'hydrogène bas-carbone.....	66
3.2.3. L'hybridation avec de l'électricité bas-carbone .....	67

<b>3.3. L'amélioration de l'efficacité énergétique des flottes aériennes.....</b>	<b>67</b>
3.3.1. Le développement de nouveaux avions .....	67
3.3.2. L'amélioration des opérations en vol et au sol .....	71
<b>3.4. L'augmentation du taux de remplissage.....</b>	<b>72</b>
<b>3.5. Le report modal vers des modes de transports moins émetteurs et le développement de l'intermodalité.....</b>	<b>73</b>
3.5.1. Le report modal de l'avion vers le train, un levier de baisse des émissions.....	73
3.5.2. Facteurs contribuant au report modal du train vers l'avion.....	73
3.5.3. Le développement de l'intermodalité .....	74
<b>3.6. La réduction ou la modération du trafic .....</b>	<b>74</b>
<b>4. SCENARIOS DE TRANSITION ECOLOGIQUE ENTRE 2020 ET 2050.....</b>	<b>76</b>
<b>4.1. Un exercice d'élaboration de scénarios contrastés qui s'inspire de scénarios existants .....</b>	<b>76</b>
<b>4.2. Une étude qui repose sur une consultation des parties prenantes du secteur.....</b>	<b>77</b>
<b>4.3. Des scénarios co-construits par l'ADEME, la DGAC et la DGEC.....</b>	<b>78</b>
<b>4.4. Récits et hypothèses générales associés au scénario de référence et aux scénarios de transition.....</b>	<b>78</b>
4.4.1. Récits généraux.....	78
4.4.2. Baisse de l'intensité carbone du mix énergétique .....	80
4.4.3. Amélioration de l'efficacité énergétique des flottes .....	88
4.4.4. Amélioration des taux de remplissage des appareils.....	91
4.4.5. Report modal et modération du trafic .....	91
<b>4.5. Synthèse des hypothèses simplificatrices retenues précédemment.....</b>	<b>96</b>
<b>5. ANALYSE DES IMPACTS DES SCENARIOS DE TRANSITION .....</b>	<b>98</b>
<b>5.1. Une évaluation des émissions de CO<sub>2</sub> de 2020 à 2050 réalisée grâce à un modèle développé spécifiquement pour les besoins de l'étude .....</b>	<b>98</b>
5.1.1. Description du modèle utilisé .....	98
5.1.2. Réductions d'émissions de CO <sub>2</sub> liées à la mobilisation de chaque levier dans chaque scénario .....	100
5.1.3. Emissions annuelles de CO <sub>2</sub> dans les différents scénarios .....	111
5.1.4. Emissions cumulées de CO <sub>2</sub> dans les différents scénarios .....	116
5.1.5. Analyse de la faisabilité et de l'acceptabilité des scénarios .....	118
<b>5.2. Analyse des autres impacts environnementaux des scénarios.....</b>	<b>121</b>
5.2.1. Hiérarchisation des enjeux environnementaux liés au secteur aérien .....	121
5.2.2. Evaluation des impacts des scénarios sur les enjeux environnementaux hiérarchisés .....	123
5.2.3. Synthèse des impacts par scénarios .....	137
<b>5.3. Analyse des impacts socio-économiques des scénarios.....</b>	<b>138</b>
5.3.1. Méthode.....	138
5.3.2. Résultats.....	140
<b>6. MISE EN ŒUVRE DES SCENARIOS.....</b>	<b>146</b>
<b>6.1. Introduction .....</b>	<b>146</b>
<b>6.2. Mesures de mises en œuvre identifiées .....</b>	<b>147</b>
6.2.1. Mesures de rehaussement de l'ambition des objectifs climatiques nationaux et internationaux relatifs au secteur aérien .....	147
6.2.2. Mesures d'accompagnement à la diversification des activités des acteurs du secteur et à la reconversion professionnelle .....	149
6.2.3. Mesures de réduction et/ou de modération du trafic aérien des Français.....	151
6.2.4. Mesures de réduction et/ou de modération du trafic aérien des étrangers vers et depuis la France.....	154
6.2.5. Mesures favorisant le report modal vers des modes de transport moins émetteurs .....	156
6.2.6. Mesures d'amélioration de l'efficacité énergétique des flottes et augmentation du taux de remplissage des avions.....	158
6.2.7. Mesures d'amélioration des opérations en vol et au sol .....	161

6.2.8.	Mesures de baisse de l'intensité carbone du mix énergétique embarqué par les avions.....	163
6.2.9.	Mesures de décarbonation des aéroports .....	166
6.2.10.	Mesures de compensation des émissions résiduelles .....	168
<b>CONCLUSION .....</b>		<b>170</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</b>		<b>173</b>
<b>INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES.....</b>		<b>184</b>
<b>Tableaux .....</b>		<b>184</b>
<b>Figures.....</b>		<b>186</b>
<b>SIGLES ET ACRONYMES .....</b>		<b>189</b>

## RÉSUMÉ EXÉCUTIF

L'objectif de cette étude est d'analyser **différentes pistes de transition écologique du secteur aérien**, à l'échelle nationale, permettant de contribuer à l'objectif de neutralité carbone que la France s'est fixé à l'horizon 2050.

Le trafic aérien français est en forte hausse, notamment depuis 1990, du fait d'une augmentation importante des vols internationaux. Selon les prévisions du secteur, cette tendance devrait se poursuivre. Le secteur aérien est un levier de croissance pour l'économie française et mondiale, ainsi qu'un générateur de nombreux emplois directs et indirects. Cependant, cette croissance du trafic aérien français a entraîné une **augmentation des émissions de gaz à effet de serre (GES)** du secteur (+85 % de 1990 à 2019), ainsi que d'autres nuisances (pollution de l'air, bruit), malgré les progrès réalisés en termes d'efficacité énergétique des avions.

L'étude considère **cinq catégories de leviers de « décarbonation »** : l'augmentation du remplissage, l'amélioration de l'efficacité énergétique, la baisse de l'intensité carbone de l'énergie consommée, le report modal et la réduction du niveau de trafic.

**Trois scénarios contrastés de transition bas-carbone ont été élaborés :**

- Le scénario A (« **rupture technologique** »), dans lequel des investissements importants sont réalisés dans la recherche et construction aéronautique ainsi que dans la production de Carburants d'Aviation Durables (CAD), et ce, afin de conserver une croissance du trafic aérien ;
- Le scénario B (« **modération du trafic** »), qui mobilise à la fois des mesures de sobriété pour stabiliser le niveau de trafic aérien et un développement important de l'usage des CAD, visant à minimiser les émissions cumulées entre 2020 et 2050 et à réduire nettement les émissions d'ici 2030 ;
- Le scénario C (« **tous leviers** »), qui mobilise l'ensemble des leviers à un degré moindre que dans les deux premiers scénarios, et ce afin de réduire les risques et les coûts liés au recours à des technologies de rupture, ainsi que les impacts socio-économiques des mesures de modération du trafic.

Ces trois scénarios sont complétés par le **scénario 0 (« référence »)**, dans lequel le trafic aérien et les progrès technologiques se développent selon les tendances actuelles, sans modération du trafic ni déploiement de solutions innovantes.

L'élaboration des scénarios ainsi que l'étude de leurs impacts climatiques, environnementaux et économiques permet de tirer de **nombreux enseignements**.

Tout d'abord, **les émissions de CO<sub>2</sub> liées aux vols décollant de France peuvent être nettement réduites** entre 2019 et 2050 (de 71 % à 81 % selon les scénarios) par la mobilisation des leviers de décarbonation. Cependant, les vols internationaux arrivant en France et les vols au départ des Outre-mer resteront plus intenses en carbone. En effet, ils utiliseront probablement encore du kérosène en 2050, notamment en raison de l'incapacité de certains pays et des territoires ultra-marins à diminuer suffisamment l'intensité carbone de leur mix électrique et donc à produire des électrocarburants (un des deux types de CAD) bas-carbone.

Pour réduire les émissions de GES associées aux vols au départ du territoire, **la France dispose de trois leviers majeurs** : l'amélioration de l'efficacité des avions, le recours aux CAD et la maîtrise du trafic. Les autres leviers, notamment le recours aux avions à hydrogène et électriques, permettent des réductions d'émissions plus faibles car leur déploiement restera limité. En particulier, l'hydrogène ne représente que 7 % de l'énergie consommée par les avions en 2050 dans le scénario (A) le plus favorable.

**Les leviers d'amélioration de l'efficacité des flottes et de baisse de l'intensité carbone du mix énergétique sont des leviers de moyen / long terme.** Ces leviers nécessitent d'importants investissements publics et privés pour pouvoir être déployés de manière significative. Leur mobilisation conduira probablement à une hausse importante des coûts d'opération des compagnies aériennes et donc du prix des billets, qui pourrait conduire à une baisse significative de la demande.

Si tous les avions sont certifiés pour voler avec 100 % de CAD, les biocarburants et les électrocarburants pourraient représenter jusqu'à 90 % des carburants embarqués par les avions en 2050. Cependant, les avions actuels pourraient ne pas obtenir une telle certification et être limités à un taux d'incorporation de 50 % de CAD par vol. Par ailleurs, **la production massive de ces carburants alternatifs mobilise des ressources** (résidus de culture, électricité bas-carbone) potentiellement nécessaires à la transition d'autres secteurs d'activités (transports routiers, bâtiments, industrie, matériaux biosourcés) : un arbitrage sera nécessaire.

Enfin, **le levier de la maîtrise du trafic présente des avantages indéniables** : efficacité, disponibilité à court terme, moindre consommation d'énergie et réduction d'autres impacts environnementaux (effet hors CO<sub>2</sub>, pollution de l'air et bruit). Ainsi, le scénario B (« modération du trafic ») est celui qui permet la décarbonation la plus poussée : niveau des émissions en 2050 divisée par 5 par rapport à 2019, émissions cumulées sur 2020-2050 divisées par 2 par rapport au tendanciel, et baisse sensible des émissions dès 2030. Ce levier a cependant des conséquences en termes d'offre (pour les voyageurs et clients du fret), d'emplois directs et indirects (stabilisation) et de perspectives économiques et de possibles « fuites de trafic »

**La France a déjà commencé à mobiliser certains des leviers de décarbonation du secteur aérien** : appel à projets national pour la production de carburants aéronautiques durables, plan de soutien à l'aéronautique, articles de la loi Climat & Résilience. Parallèlement, les acteurs de la construction aéronautique poursuivent leurs travaux pour apporter les solutions technologiques évoquées plus haut.

Afin de compléter ces actions et viser des résultats à court terme, des approfondissements sont nécessaires pour évaluer quels pourraient être le niveau et les modalités concrètes du recours au levier de la maîtrise du trafic. A cette fin, **une étude de faisabilité et d'évaluation des impacts socio-économiques puis des expérimentations devraient être réalisées à la suite de la présente étude.**

Cette étude s'est appuyée sur **une large consultation des acteurs et experts du secteur** via des entretiens, ateliers, ainsi qu'une revue bibliographique approfondie.

**Le rapport complet de l'étude** ainsi que des infographies synthétisant les principaux enseignements sont disponibles sur le **site de l'ADEME**.

## ABSTRACT

The objective of this study is to analyse **different ecological transition paths of the aviation sector**, on a national scale, contributing to France carbon neutrality objective for 2050.

**French air traffic has been rising sharply**, particularly since 1990, due to the significant increase in international flights. According to industry forecasts, this trend is expected to continue. The air transport sector is a growth lever for the French and global economy, as well as a generator of numerous direct and indirect jobs. However, this growth of French air traffic has led to an **increase in the sector's greenhouse gas (GHG) emissions** (+85 % between 1990 and 2019), as well as other nuisances (air pollution, noise), despite the progress made in terms of energy efficiency of aircrafts.

The study considers **five categories of levers of decarbonisation**: increasing load factors, increasing energy efficiency, reducing carbon intensity of energy consumed, modal shift and reducing level of traffic.

**Three contrasting low-carbon transition scenarios have been developed:**

- **Scenario A ("technological breakthrough")**, in which major investments are made in aeronautical research and construction as well as in the production of Sustainable Aviation Fuels (SAFs), to maintain traffic growth.
- **Scenario B ("traffic moderation")** mobilises both sobriety measures to stabilize the level of air traffic and an significant development in the use of SAFs, aiming to minimise cumulative emissions between 2020 and 2050 and to significantly reduce emissions by 2030.
- **Scenario C ("all levers")** mobilises all the levers to a lesser degree than in the first two scenarios, to reduce the risks and costs associated with the use of breakthrough technologies, as well as the socio-economic impacts of traffic reduction measures.

The above three scenarios are complemented by a **scenario 0 ("baseline")**, in which air traffic and technological progress develop according to current trends, without reducing air traffic or deploying innovative solutions.

The development of the above scenarios and the study of their climatic, environmental, and economic impacts allow **many lessons** to be drawn.

First, **CO<sub>2</sub> emissions from flights taking off from France can be significantly reduced** between 2019 and 2050 (by 71 % to 91 % depending on the scenario) by mobilizing decarbonisation levers. However, international flights arriving in France and flights departing from the Overseas Territories will remain more carbon intensive. Indeed, these last two categories of flights will probably still be using kerosene in 2050, notably due to the inability of certain countries and Overseas Territories to sufficiently reduce the carbon intensity of their electricity mix and therefore to produce low-carbon electrofuels (one of the two types of SAFs).

To reduce GHG emissions associated with flights departing from the country, **France has three major levers**: improving aircraft efficiency, using SAFs, and controlling traffic. The other levers, in particular the use of hydrogen and electric aircrafts, will result in lower emissions reductions because their deployment will remain limited. Hydrogen represents only 7 % of the energy consumed by aircrafts in 2050 in the most favourable scenario (A).

**The levers to improve fleet efficiency and to reduce the carbon intensity of the energy mix are medium to long term levers.** These levers require significant public and private investment to be deployed in a meaningful way. Their mobilisation will probably lead to a significant increase in the operating costs of airlines and therefore in ticket prices, which could lead to a significant drop in demand.

On the other hand, if all aircraft are certified to fly on 100 % SAF, biofuels and electrofuels could account for up to 90 % of the fuel carried by aircraft in 2050. However, today's aircraft may not be certified to fly on 100 % SAF and may be limited to a 50 % SAF incorporation rate per flight. **Moreover, the massive production of these alternative fuels mobilises resources** (crop residues, low-carbon electricity) potentially necessary for the transition of other sectors of activity (road transport, buildings, industry, biobased materials): a trade-off will be necessary.

**The lever of traffic control has undeniable advantages**: efficiency, short-term availability, lower energy consumption, and reduction of other environmental impacts (non-CO<sub>2</sub> effect, air pollution and noise). Thus, scenario B is the scenario that allows for the most advanced decarbonisation (level of emissions in 2050, cumulative emissions over 2020-2050, a significant drop in emissions from 2030). However, this lever has negative consequences in terms of supply (for passengers and freight customers), direct and indirect employment and economic prospects and possible "traffic leakage".

**France has already started to mobilise some of the levers for decarbonising the aviation sector**: national call for projects to produce sustainable aeronautical fuels, aeronautical support plan, articles of the Climate & Resilience law. At the same time, the players in the aeronautical construction industry are continuing their work to provide the above-mentioned technological solutions.

To complete these actions and aim for short-term results, in-depth studies are necessary to assess what could be the level and concrete methods of recourse to the traffic control lever. To this end, **a feasibility study and evaluation of socio-economic impacts and then experiments should be carried out following this study.**

The study was based on an extensive **consultation** of stakeholders and experts in the sector through interviews, workshops, and an extensive literature review.

**The full report of the study**, a summary as well as infographics summarising the main findings are available on the ADEME website.



# 1. CONTEXTE, OBJECTIFS ET DEROULE DE L'ETUDE

## 1.1. Contexte et objectifs de l'étude

Jusqu'à la crise sanitaire, le secteur aérien était depuis plusieurs décennies un secteur en forte croissance et à forte valeur ajoutée avec un impact climatique grandissant.

En effet, au niveau mondial le nombre de passagers transportés par an a été multiplié par 8, passant de 310 millions à plus de 4,5 milliards sur la période 1970 – 2019 [1]. A l'échelle mondiale, 6 mille milliards de dollars de marchandises transitent par avion. Le fret aérien représente 35 % des échanges de marchandises en valeur pour seulement 1 % des échanges de marchandises en volume [2].

En France, le trafic connaît la même tendance, et a ainsi augmenté de +67 % (en Passagers-équivalent-Kilomètres-Transportés<sup>1</sup> (PKTeq) entre 2000 et 2019, date à laquelle 179 millions de passagers ont été transportés. Le secteur employait 350 000 Equivalents Temps Plein (ETP<sup>2</sup>) directs et indirects en 2018 en France ([3] et [4]) et représentait 4,3 % du PIB Français en 2018 [5].

En parallèle, en France, malgré une baisse des émissions unitaires de Gaz à Effet de Serre (GES) (par PKTeq) de 25 % entre 2000 et 2019, l'impact du secteur sur le climat s'est intensifié avec une augmentation de 24 % des émissions liées aux vols commerciaux sur la même période (et même 85 % sur la période 1990-2019). Les vols au départ et à l'arrivée de la France ont ainsi émis 24 millions de tonnes de CO<sub>2</sub> en 2019 en comptabilisant les demi-croisières (hors amont – Périmètre « Départs et arrivées France », voir Tableau 1) [6]. Au contraire, les émissions territoriales françaises ont baissé de 20 % entre 1990 et 2019 (toutes activités confondues, hors Utilisation des terres, changement d'affectation des terres et foresterie (UTCATF) et hors sources internationales). Le poids du transport aérien dans les émissions nationales<sup>3</sup> a donc augmenté entre 1990 et 2019, en passant de 2,4 % à 5,3 % [7].

Cette évolution passée des émissions de GES du transport aérien français contraste fortement avec l'objectif d'atteinte de la neutralité carbone en 2050 adopté par la France dans la loi du 8 novembre 2019 relative à l'énergie et au climat [8] ainsi qu'avec la trajectoire de diminution globale des émissions de GES prévue dans la SNBC [9].

Cette situation a conduit de nombreux acteurs à se positionner sur la réduction des impacts environnementaux du secteur aérien, et ce à travers :

- Des publications réalisées sur l'impact du secteur aérien sur l'environnement, publications issues aussi bien d'organes appartenant aux institutions publiques (Ministère de la Transition Ecologique (MTE) [10], Direction Générale de l'Aviation Civile (DGAC) [6], Organisation de l'Aviation Civile Internationale (OACI) [11],...), au secteur privé (Groupe d'action du transport aérien (ATAG) [12], Association du transport aérien international (IATA) [13] .) ainsi qu'au secteur associatif (Notre Affaire à Tous [14], Shift Project/Supaero Decarbo<sup>4</sup>[15] ...);
- De nombreuses prises de position (Organisations Non Gouvernementales, élus, gouvernement...) autour du « Plan de soutien à l'aéronautique » [16] de 2020 en France, des mesures concernant le secteur aérien de la Convention Citoyenne pour le Climat [17] et de la loi Climat & Résilience [18];
- De rapports généraux tels que le rapport annuel 2022 du Haut Conseil pour le Climat [19].

Par ailleurs des organes internationaux du secteur se sont aussi prononcés en prenant des engagements climatiques dont l'ambition est généralement revue à la hausse lors de leurs révisions successives<sup>5</sup> :

- En 2008, l'ATAG s'est aussi engagé aux objectifs suivants : réduction de la consommation de carburants de -1,5 % par an entre 2009 et 2020, stabilisation des émissions post-2020 au niveau de 2020 [20];
- L'OACI reprend en 2010 les deux premiers objectifs de l'ATAG : une réduction de la consommation de carburant et une croissance neutre en carbone à partir de 2020. Pour cela, l'organisme s'appuie sur une amélioration de la performance énergétique continue entre +1,5 et +2 % par an [21], l'utilisation de mécanismes de compensation et l'utilisation massive de carburants alternatifs ;
- L'Association des industries aérospatiales (AIA), représentant le secteur de l'aviation aux États-Unis a aussi participé à l'accord de 2008 du groupe d'action sur le transport aérien lors de la

<sup>1</sup> 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.

<sup>2</sup> Les acronymes sont disponibles dans la Partie « Sigles et acronymes » p9.

<sup>3</sup> Correspondant au rapport entre les émissions de gaz à effet de serre des vols intérieurs et internationaux au départ de la France et les émissions territoriales tous secteurs confondus (hors secteur des terres ou « UTCATF »).

<sup>4</sup> « Supaéro-Decarbo » est devenu depuis « Aéro-Decarbo ».

<sup>5</sup> Ces engagements sont détaillés et remis en perspective en Annexe 2.

fixation de l'objectif de réduction de 50 % des émissions nettes de CO<sub>2</sub> d'ici 2050 par rapport au 2005 pour le secteur industriel de l'aéronautique [12].

- Finalement en 2021, l'IATA s'est engagé à atteindre zéro émissions nettes en 2050 [13].

Ces engagements actuels sont par ailleurs 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 l'Accord de Paris [22].

Enfin, au niveau européen, la présidence française de l'Union européenne a été l'occasion d'adopter la « Déclaration de Toulouse sur le développement durable et la décarbonation de l'aviation ». Signée par les 27 États membres de l'Union, 10 États de la Conférence européenne de l'aviation civile (CEAC) et près de 150 acteurs privés de l'industrie aéronautique civile, cette déclaration fixe comme objectif l'atteinte de la neutralité carbone d'ici à 2050 [23].

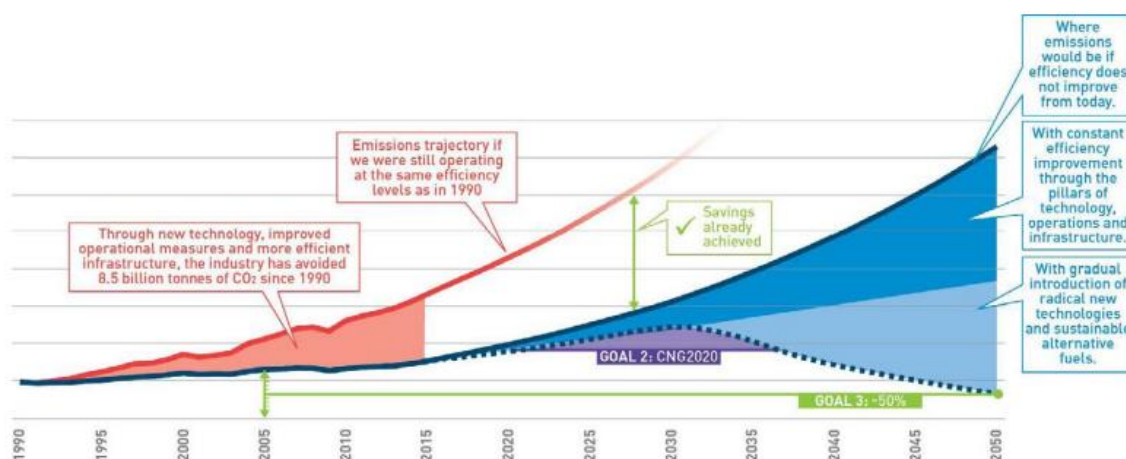


Figure 1 : Objectifs du secteur industriel aéronautique selon l'IATA [21]

## Un secteur en forte croissance et à forte valeur ajoutée dont l'impact climatique devient de plus en plus important

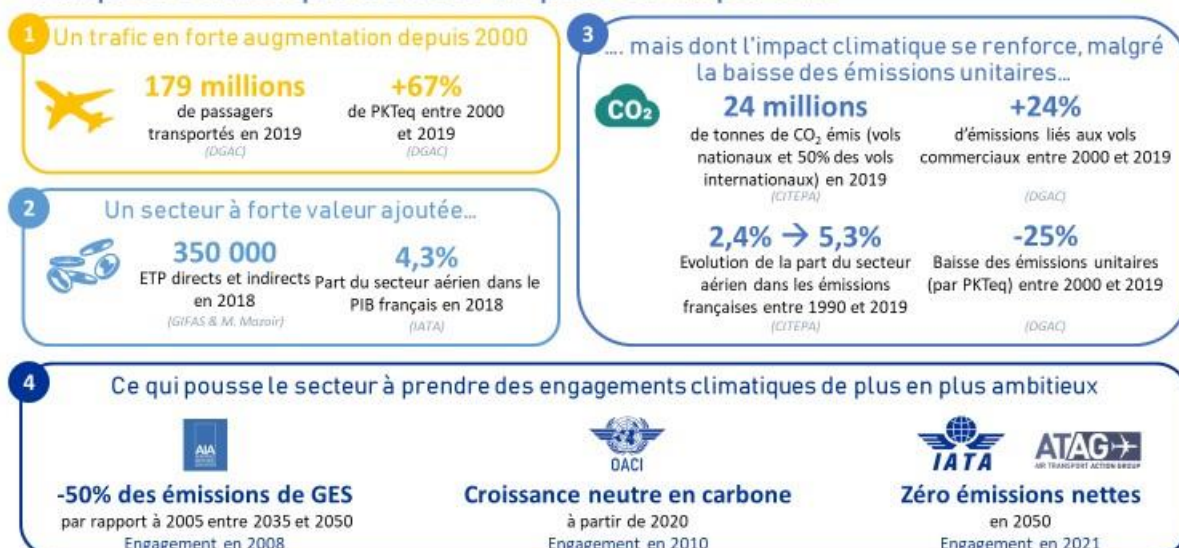


Figure 2 : Le secteur aérien, un secteur en forte croissance et à forte valeur ajoutée dont l'impact climatique devient de plus en plus important

Dans le cadre de la présente étude, l'ADEME souhaite étudier de **manière objective et scientifique** les leviers de décarbonation du transport aérien, et élaborer **trois scénarios contrastés**, représentant trois stratégies potentielles pour la période 2020-2050. Cette étude repose sur une mobilisation des acteurs

pertinents afin de s'appuyer sur les connaissances disponibles. Elle intègre également une analyse des autres impacts environnementaux ainsi que des impacts socio-économiques des scénarios de transition.

## 1.2. Approche générale

Pour mener à bien cet objectif, cette étude a été décomposée en plusieurs phases dont les résultats sont décrits dans la suite de ce document.

Tout d'abord un état des lieux du secteur aérien a été réalisé afin de recenser la connaissance existante de ses impacts environnementaux et économiques, ainsi que de ses acteurs et de la manière dont il est réglementé<sup>6</sup>. Dans un second temps, les leviers d'action permettant de diminuer ces impacts ont été identifiés et présentés, notamment via la consultation des parties prenantes du secteur. Par la suite, un modèle a été créé permettant d'élaborer des scénarios prospectifs de décarbonation du secteur et d'évaluer leur impact CO<sub>2</sub>. Trois scénarios prospectifs contrastés ont ensuite été construits, grâce à une collaboration entre l'ADEME, la DGAC et la DGEC. Leurs impacts environnementaux et socio-économiques ont été étudiés objectivement et quantitativement lorsque cela était possible. Finalement l'étude s'est conclue par l'identification d'une série de mesures générales permettant de réduire les impacts du secteur.

Différents acteurs du secteur ont été associés à cette démarche tout au long de l'étude, par différents moyens :

- Des entretiens ont été réalisés avec les acteurs suivants afin de comprendre leurs enjeux et prises de position sur le sujet de la transition écologique du secteur aérien : Direction Générale de l'Énergie et du Climat (DGEC) – BQA, Direction Générale de l'Aviation Civile (DGAC) – SDE, SDC, SDD, Service Transport & Mobilités de l'Agence de la transition écologique (ADEME), Union des Aéroports Français et Francophones Associés (UAF & FA), Direction des Services de la Navigation Aérienne (DSNA), Air France, Airbus, ISAE-Supaéro, Shift Project/Aéro Décarbo, Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales (ONERA) ;
- Un Comité Consultatif a réuni à deux reprises les acteurs suivants dans la réalisation de l'étude (pour l'identification de leviers et pour la consultation des résultats des scénarios) : ADEME, DGEC, DGAC, Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique (CITEPA), Institut du Développement et des Ressources Internationales (IDDR), ISAE-Supaéro, Sciences Po, Aéro Décarbo, Atécopol ;
- Trois ateliers ont permis aux parties prenantes du secteur aérien d'être consultées notamment sur les leviers de décarbonation du secteur et sur les mesures et politiques publiques à mettre en œuvre pour la transition de celui-ci. Étaient présents à ces ateliers des participants issus d'entités des secteurs suivants : constructeurs aéronautiques, régulateurs, aéroports, associations professionnelles, compagnies aériennes, transporteurs, recherche, consultants, associations environnementales, associations de défense des riverains, associations de consommateurs.

En particulier, la DGAC a contribué lors de cette étude :

- A la fourniture d'une partie des données sous-jacentes au modèle ;
- A la co-construction des récits et des hypothèses sous-jacentes au scénario de référence et aux scénarios de transition ;
- A la relecture de ce rapport et des différents livrables de l'étude (fiches leviers, synthèses).

Les arbitrages et les conclusions de l'étude relèvent de la responsabilité de l'ADEME, qui est le commanditaire de ce rapport.

---

<sup>6</sup> Toutes les données citées dans cette étude s'appuient sur la littérature existante, citée en Annexe 1.

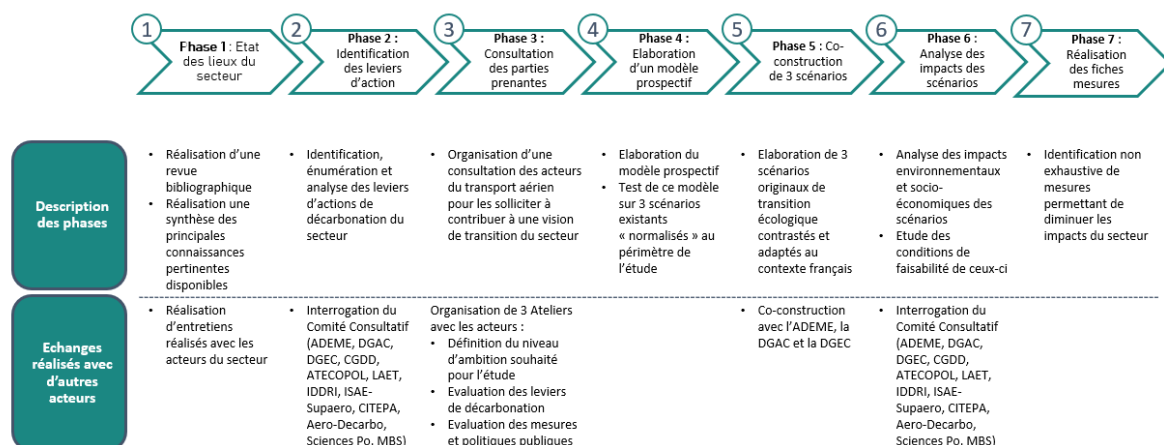


Figure 3 : Phasage général de l'étude

### 1.3. Périmètre de l'étude

La transition environnementale étudiée en priorité dans cette étude est la décarbonation du secteur aérien, puisque ce secteur a un impact climatique significatif et en forte croissance et que le CO<sub>2</sub> est le principal GES émis par ce secteur. La comptabilisation des émissions de CO<sub>2</sub> du secteur se fait selon les périmètres suivants :

- **Périmètre temporel** : les modélisations des émissions de CO<sub>2</sub> du secteur démarrent en 2015 et les scénarios s'étendent jusqu'en 2050. Les résultats portent sur la période 2019 ou 2020 à 2050.
- **Nature des vols comptabilisés** : il s'agit uniquement des vols commerciaux de passagers et de fret. Les vols privés ou militaires sont donc exclus de l'étude.
- **Périmètre opérationnel** : les opérations prises en compte quantitativement dans cette étude concernent la production et la distribution d'énergie, l'utilisation des Groupes auxiliaires de puissance (APU<sup>7</sup>), les phases Landing and Take Off (LTO<sup>8</sup>) et la phase de croisière (ou demi-croisière). Sont exclues de l'étude les émissions associées au cycle de vie de l'avion (extraction des matériaux, fin de vie...), à la construction des infrastructures (aéroports...) ainsi qu'au matériel de soutien au sol (GSE). Les émissions associées aux accès vers et depuis les aéroports ainsi que les émissions des aéroports sont uniquement incluses de façon qualitative.
- **Vols considérés** : l'étude mobilise deux méthodes différentes de comptabilisation. Ces deux méthodes sont équivalentes au périmètre monde (tous les vols y sont comptabilisés sans doublons) mais induisent des modifications des répartitions entre pays ou secteurs d'activités lorsqu'on les utilise au niveau national (tel que c'est le cas dans cette étude). Chaque méthode présente ses avantages et inconvénients (Tableau 1).

Tableau 1 : Périmètres de comptabilisation des émissions de CO<sub>2</sub> dans les différents scénarios

	Périmètre « Départs et arrivées France »	Périmètre « Départs France »
Vols concernés	Tous les vols au départ et à l'arrivée de la France	Tous les vols au départ de la France
Emissions liées aux croisières	1/2 croisières	Croisières complètes
Avantages	Prise en compte des consommations des vols internationaux entrants en France, et donc dans certains cas, de la non-utilisation de carburants alternatifs, contrairement aux vols sortants de France (lié à l'incapacité de certains pays à produire des	Prise en compte complète des baisses d'émissions liées aux efforts de décarbonation sur le territoire français

<sup>7</sup> APU pour Auxiliary Power Unit est un « petit turboréacteur embarqué, situé en général à l'arrière du fuselage, qui permet à l'avion d'être autonome en escale pour l'air (compresseur haute pression) et l'électricité » [24]

<sup>8</sup> Le cycle « décollage atterrissage » ou LTO (pour Landing and Take Off) regroupe les phases de roulage, de décollage, de montée, d'approche et d'atterrissage des vols



	carburants de synthèse suffisamment décarbonés notamment)	
Inconvénients	Représentation incomplète des baisses d'émissions liées aux efforts de décarbonation français	Non prise en compte des émissions liées aux vols arrivant en France, qui embarquent un mix différent de carburants, probablement moins décarboné
Etudes récentes utilisant ce périmètre	<ul style="list-style-type: none"> <li>• « Pouvoir voler en 2050 » - Supaéro-décarbo, The Shift Project - 2021.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• « Roadmap to climate neutral aviation in Europe » - Transport &amp; Environment – 2022</li> <li>• « Destination 2050 » - A4E, ACI Europe, ASD, ERA, et CANSO - 2021</li> <li>• « Decarbonation road-map: a path to net zero » - Sustainable aviation UK - 2020</li> </ul>

Les impacts socio-économiques sont par ailleurs étudiés de façon quantitative. Les autres impacts environnementaux analysés (au nombre de six : les effets hors CO<sub>2</sub> sur le forçage radiatif, la qualité et l'artificialisation des sols et des paysages, la biodiversité, la pollution de l'air, les nuisances sonores et les risques technologiques) font quant à eux l'objet d'une analyse qualitative.

A noter que certains éléments sont exclus de l'étude : les mécanismes de compensation et ceux de captage et de stockage du carbone ne sont par exemple pas modélisés alors qu'ils interviennent dans de nombreux rapports existants. Par ailleurs, l'étude ne prend pas en considération les impacts que peut avoir le dérèglement climatique sur le secteur, ni sur la capacité à voler des avions (modification de la masse volumique de l'air, des vents dominants ...) ainsi que sur l'organisation actuelle du secteur (la présence d'aéroports aux abords de côtes maritimes et la hausse des niveaux de la mer, l'organisation des pistes d'atterrissage en fonction des vents dominants...).

## 2. LE SECTEUR AERIEN, UN SECTEUR CONFRONTE A DE NOMBREUX ENJEUX

### 2.1. L'avion, un mode de transport en fort développement

#### 2.1.1. Un vecteur de mondialisation en forte croissance

##### Un secteur en forte croissance depuis 1970, et ce au niveau mondial

Le transport aérien a connu une très forte croissance depuis 50 ans, tant en termes de nombre de passagers et de volume de marchandises transportés que des distances parcourues à l'échelle mondiale :

- Le nombre de passagers transportés par an a été multiplié par 8 en 50 ans, passant de 310 millions en 1970 à plus de 4,5 milliards de passagers par an 2019 [25]. La distance parcourue par l'ensemble des passagers a quant à elle été multipliée par 75, passant de 109 milliards de km par an en 1960 à 8269 milliards de km par an en 2018 [26] ;
- Le volume annuel de marchandises transportées, combiné aux distances parcourues, a été multiplié par 14, passant de 15,5 millions de tonnes-kilomètres en 1970 à plus de 221 millions de tonnes-kilomètres par an en 2019 [27].

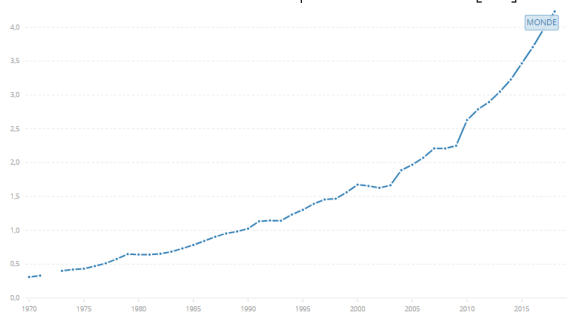


Figure 4 : Evolution du transport aérien, voyageurs transportés, 1970 à 2019 (unité : milliard) [1]

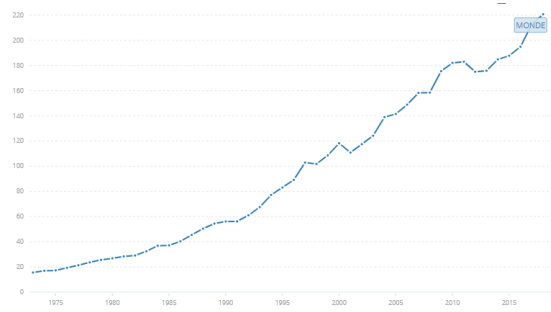


Figure 5 : Evolution du fret aérien, marchandises transportées, 1970 à 2019 (unité : million de tonnes-kilomètres) [27]

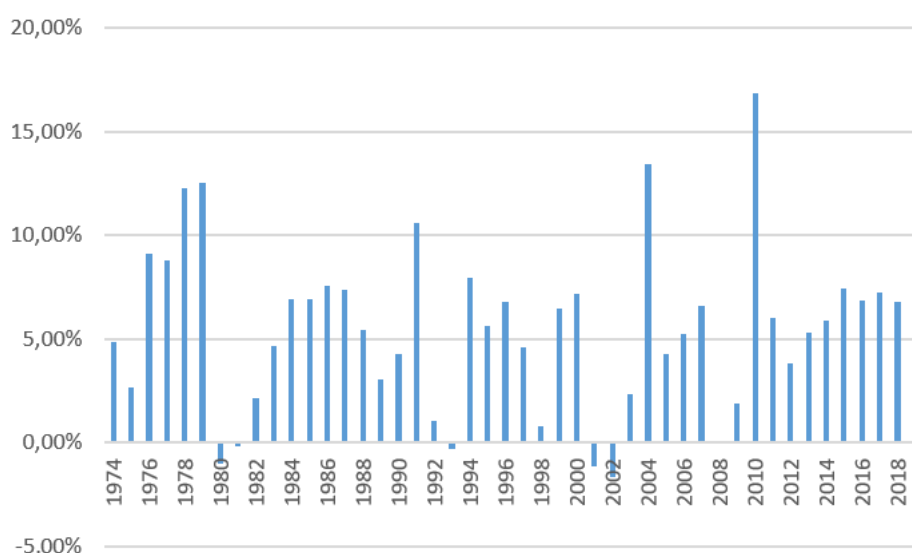


Figure 6 : Taux de croissance annuel du trafic passagers mondial entre 1974 et 2019 (en nombre de passagers transportés) [1]

Le trafic aérien mondial de passagers a ainsi connu une croissance quasiment constante sur l'ensemble de la période 1970-2019 (tant en termes de nombre de passagers transportés que de distances parcourues par ceux-ci). Sur cette période, plusieurs pics de croissance peuvent être distingués, notamment à la fin des années 70 puis au début des années 1990, 2000 et 2010. Ces pics de croissance font le plus souvent suite à des chocs externes, comme des conflits, des actes terroristes, des pandémies ou des fluctuations pétrolières. Comme cela est visible sur la Figure 6, ces chocs externes n'impactent que brièvement le

secteur, qui repart de manière très rapide après chacun d'entre eux. Entre 2012 et 2019, le nombre de passagers aérien a cru **de l'ordre de 5 à 6 %** par an.

La croissance historique du trafic est répartie de manière différenciée sur l'ensemble de la planète. Les plus grands aéroports historiques des pays développés ont ainsi connu une croissance très forte du trafic passagers (en nombre de passagers) entre 1985 et 1995, avant de connaître une baisse de celle-ci entre 1995 et 2013, puis un rebond depuis 2013. Au contraire, les plus grands aéroports des pays en voie de développement sont apparus plus tardivement, ont connu une croissance très importante du trafic passagers durant la décennie consécutive de leur apparition, puis une diminution progressive de celle-ci qui a fini par s'aligner sur le rythme de croissance des plus grands aéroports historiques des pays développés (Figure 7 et Figure 8).

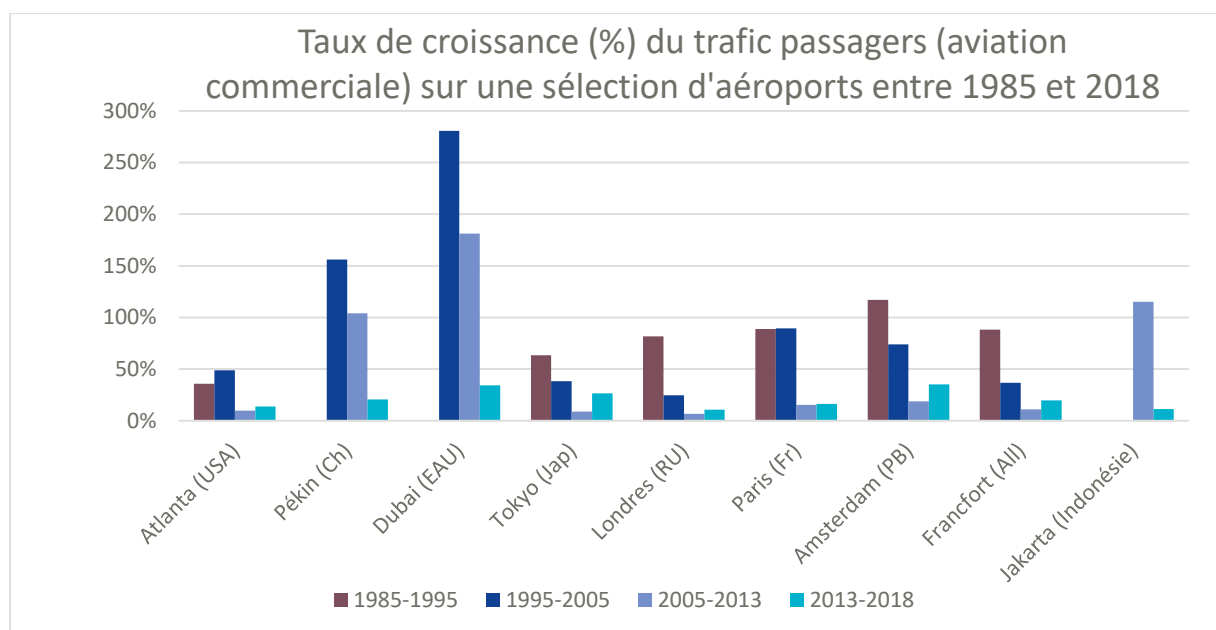


Figure 7 : Taux de croissance du trafic passagers (aviation commerciale – en nombre de passagers) sur une sélection d'aéroports entre 1985 et 2018 [28]

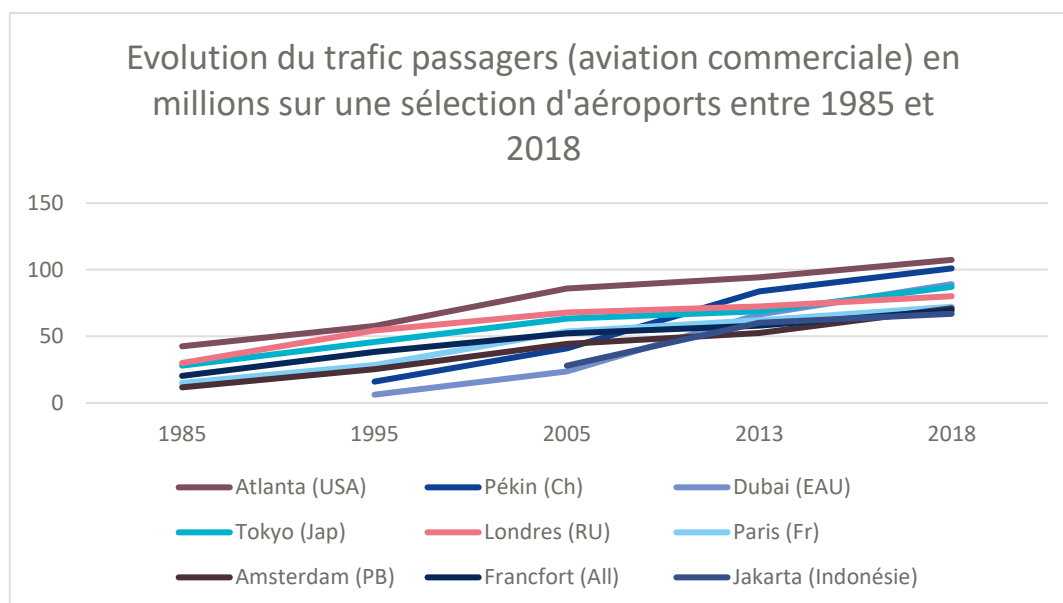


Figure 8 : Evolution du trafic passagers (aviation commerciale) en millions de passagers sur une sélection d'aéroports entre 1985 et 2018 [28]

Ce ralentissement récent du rythme de croissance du trafic dans les plus grands aéroports mondiaux par rapport à avant 2005 ne doit pas occulter le fait que la croissance du trafic aérien mondial n'a jamais été aussi forte en valeur absolue (Figure 4 et Figure 5) [28].

En 2019, 4,5 milliards de passagers ont embarqué sur l'un des 33 000 avions commerciaux [29] rattachés à l'une des 1 478 compagnies aériennes [1] qui ont proposé plus de 47 millions de vols [29] vers l'un des 3 780 aéroports commerciaux de la planète [1]. Chaque jour, cela a représenté 128 000 vols et 12,5 millions de passagers. Les 10 premiers aéroports mondiaux en nombre de passagers ont accueilli plus de 860 millions de passagers en 2019 [28] avec 76 millions pour Paris Charles de Gaulle, 9ème aéroport mondial en termes de passagers et premier aéroport français [30]. En 2019 le secteur représente près de 88 millions d'emplois (dont 11 millions d'emplois directs) dans le monde [1].

**Une croissance du trafic dont la majeure partie a lieu aujourd'hui dans les pays émergents et qui est soutenue par les offres à bas coûts dans les pays développés**

La croissance du trafic aérien (tant en termes de nombre de passagers transportés que de distance parcourue par ceux-ci) est aujourd'hui marquée par une évolution différenciée entre les continents. Les pays dont le trafic augmente le plus sont les pays émergents, notamment d'Asie du Sud et du Sud-Est ainsi que les Emirats Arabes Unis qui profitent de leur situation de barycentre entre Europe, Asie, Afrique et Océanie. La croissance du trafic dans les pays les plus développés est plus modérée et est désormais surtout soutenue par les offres à bas coûts, disponibles pour un nombre croissant de destinations, qui permettent de compenser les pertes de trafics connues par les compagnies plus classiques [28].

**Un trafic aérien qui a également connu une forte croissance en France entre 1997 et 2019**

En France, le trafic passagers a été multiplié par 5 depuis 1980 [31]. Cette hausse du trafic est essentiellement liée à la croissance du trafic international, puisque que le nombre de passagers transportés dans les vols intérieurs est resté relativement stable entre 1997 et 2019 (Figure 9).

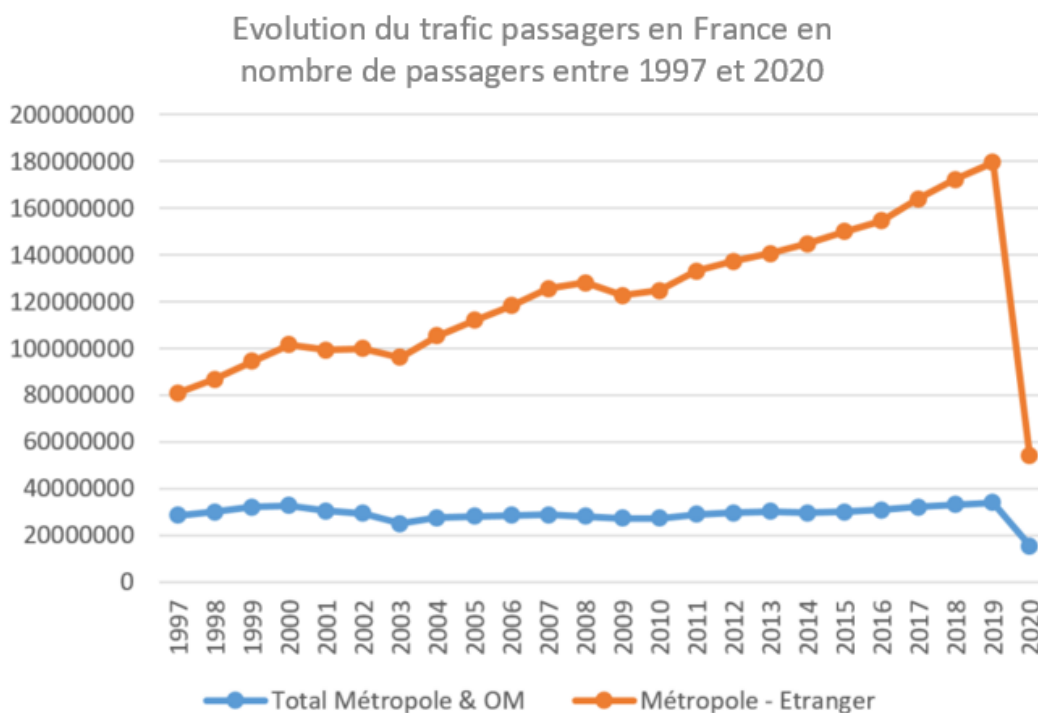
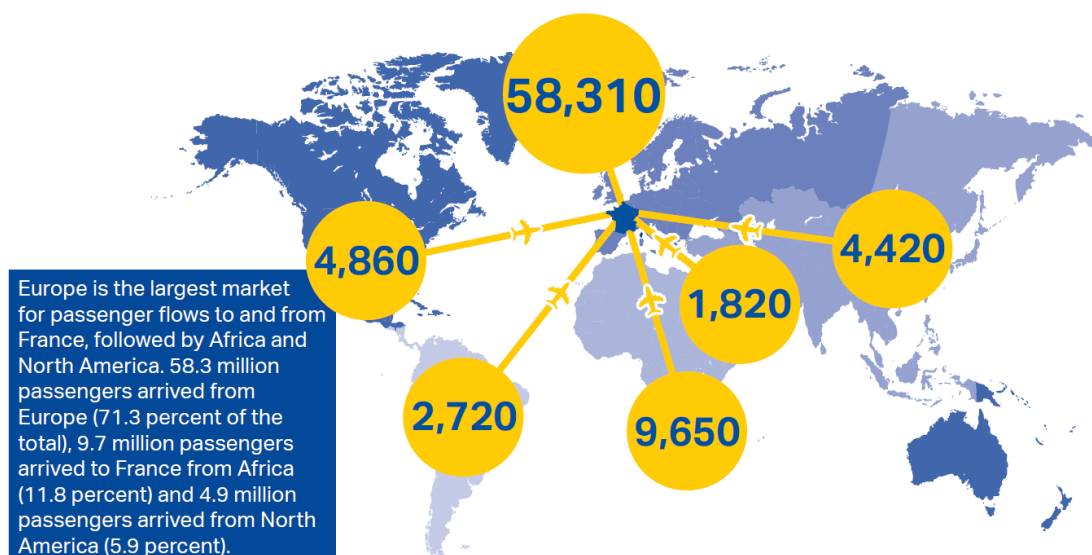


Figure 9 : Evolution du trafic passagers en France en nombre de passagers entre 1997 et 2020 (Source : DGAC)

La majorité (71 %) des passagers arrivant en France proviennent d'Europe (Figure 10). Il en va de même pour les vols qui partent de France, comme illustré sur la Figure 11. La part de ces vols a augmenté entre 2013 et 2018. Cependant, il ne s'agit pas de la zone d'arrivée avec la plus forte croissance. Cette dernière est attribuée au Moyen-Orient avec une croissance de 51 % pour des trajets le plus souvent en correspondance [5].





Source: IATA Direct Data Solutions

Figure 10 : Nombre de passagers arrivant en France ou partant de France, en millions, par zone géographique, en 2018 [5]

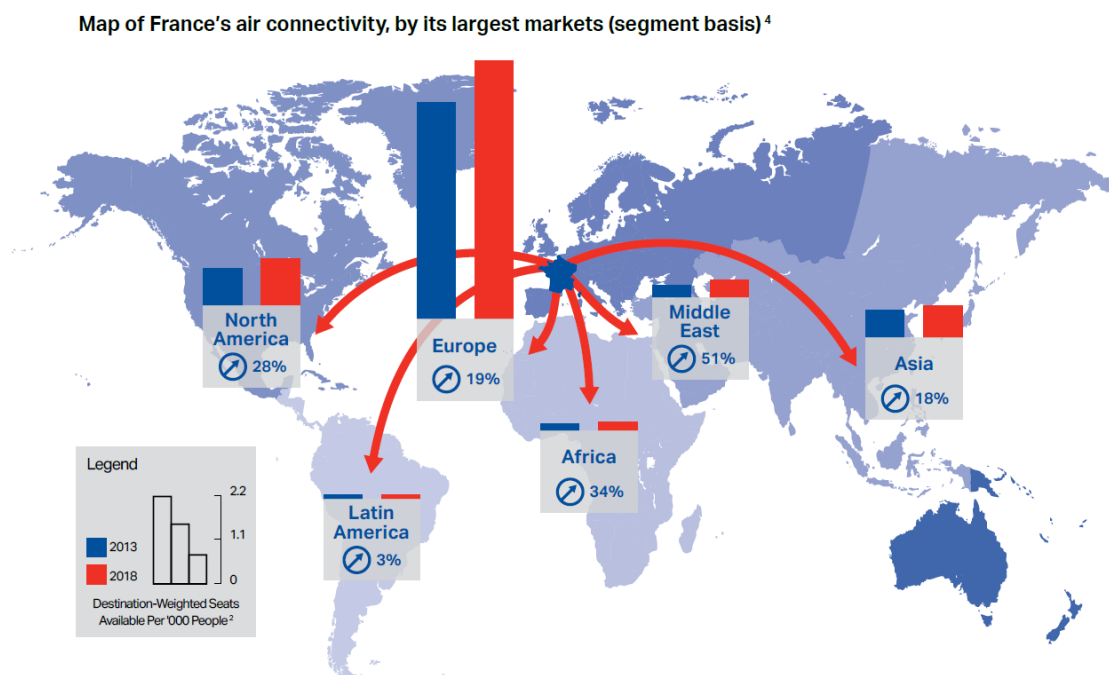


Figure 11 : Evolution des capacités de trafic passagers avec la France, entre 2013 et 2018 [5]

### **La libéralisation du secteur dans les années 1980, un facteur explicatif de la croissance du trafic aérien au sein de l'Union Européenne**

En Europe, la dérégulation du secteur aérien a débuté dans les années 80 [32]. Aujourd'hui, tout transporteur aérien établi dans l'Union Européenne (UE) peut desservir librement les destinations de son choix. Cette libéralisation couplée à la création du marché unique a contribué à accélérer le développement du marché du transport aérien européen. Entre 1995 et 2014, le nombre de passagers-kilomètres au sein de l'Union Européenne pour le secteur du transport aérien a progressé de +74 % (contre +23 % sur l'ensemble des transports). La part de l'aviation dans la totalité des transports de passagers est passée de 6,5 % à 9,2 % [33].

### **Une aviation commerciale à l'origine de l'immense majorité des consommations de carburant du secteur aérien dans le monde**

En 2018, l'aviation commerciale était à l'origine de 88 % des consommations de carburant du secteur aérien, qui se répartissent ainsi : le transport de passagers représente la grande majorité (71 %), et ce loin devant le transport commercial de fret (17 %), l'aviation militaire (8 %) et l'aviation privée (soit les vols hors transport public : vols privés, vols de formations et vols gouvernementaux – 4 %) (Figure 12).

## Répartition mondiale de la consommation de carburant pour l'aviation

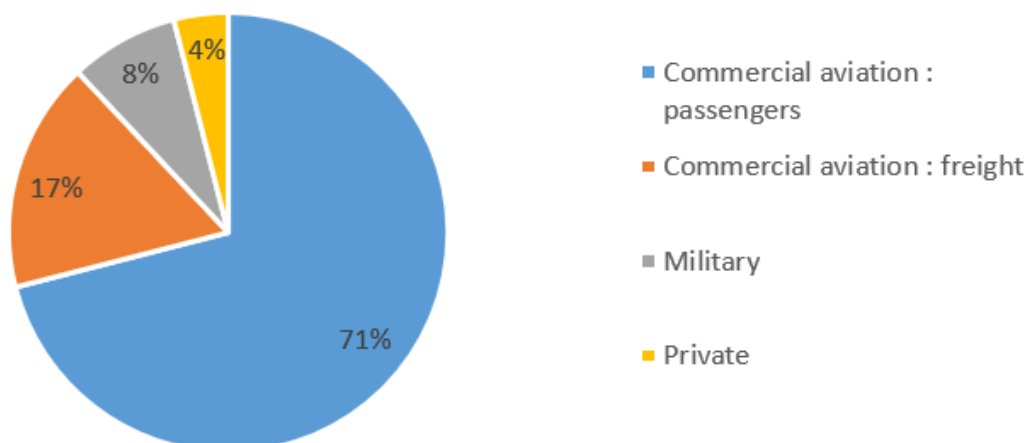


Figure 12 : Répartition mondiale de la consommation de carburant pour l'aviation [34] [35] [36] Calculé à partir de Eyers et al., 2004, IATA, 2019, ICCT, 2019, IEA, 2019

### **Le cas particulier du fret aérien : une industrie à forte valeur ajoutée qui dispose encore de fortes marges d'amélioration**

A l'échelle mondiale, 6 mille milliards de dollars de marchandises transitent par avion. Le fret aérien représente 35 % des échanges de marchandises en valeur pour seulement 1 % des échanges de marchandises en volume[1].

Sur les dernières années pré-covid, les données de croissance en volume et en valeur sont ascendantes, avec une augmentation des revenus de +6 % entre 2015 et 2019 et une augmentation de quasiment +3 % pour le volume transporté [2].

Environ 14,6 millions de tonnes de fret ont transité par les aéroports des 28 pays membres de l'Union Européenne en 2015. Cela représente une augmentation de +11 % par rapport aux niveaux de 2010. Les premiers aéroports concernés sont les aéroports allemands, suivis par les aéroports français qui ont vu passer 2,5 millions de tonnes de marchandises. Les autres pays de l'UE spécialisés dans le fret aérien sont les pays du Benelux, notamment le Luxembourg [37].

Entre 2003 et 2018, le transport aérien de marchandises en France a progressé en moyenne de +3,6 % par an pour atteindre 2,3 millions de tonnes en 2018 [38].

L'aéroport de Paris-Charles de Gaulle concentre la majorité de l'activité de fret en France, il est ainsi le 11<sup>ème</sup> aéroport mondial (et 2<sup>ème</sup> européen) avec 1 888 milliers de tonnes en 2019 [39]. L'aéroport d'Orly arrive en deuxième position avec 88 609 milliers de tonnes, suivi par Toulouse-Blagnac, Bâle-Mulhouse, Marseille-Provence et Lyon Saint Exupéry qui oscillent entre 66 000 et 56 000 tonnes. Les autres aéroports français voient transiter moins de 20 000 tonnes de marchandises par an [40]. Selon l'organisation Union TLF (Transport et Logistique de France), 70 à 80 % du cargo est transporté dans les soutes des avions passagers [41].

### **Un trafic aérien commercial qui pourrait continuer à progresser de manière très importante d'ici 2050**

Les projections de croissance du trafic aérien commercial au niveau mondial publiées par les acteurs du secteur indiquent toutes que celui-ci devrait croître à un rythme soutenu, et ce dès que la chute de trafic associée à la période COVID sera passée (Partie 2.2.1).

Par exemple l'ATAG dans son rapport Waypoint 2050 [12] présente les 3 scénarios suivants de croissance du trafic (Figure 13) :

### Scénarios des trajectoires mondiales de l'augmentation du trafic aérien (aviation commerciale) au niveau mondial en milliards de RPK selon l'ATAG

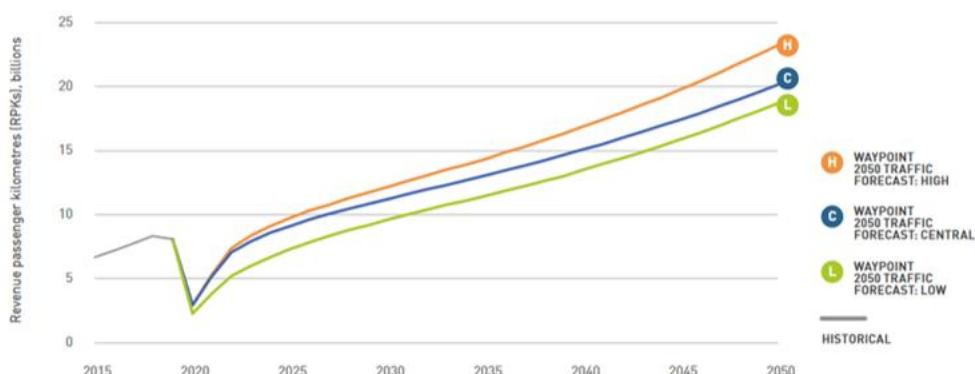


Figure 13 : Scénarios des trajectoires mondiales de l'augmentation du trafic aérien au niveau mondial en RPK (passagers payants transportés) selon l'ATAG [12]

Le scénario central prévoit ainsi **une croissance moyenne de +3 % par an du trafic aérien au niveau mondial entre 2019 et 2050** (contre +3,5% par an pour le scénario « forte croissance » et +2,7 % pour le scénario « faible croissance »), ce qui correspond à 20 milliards de Revenu-Passenger-Kilometer (RPK<sup>9</sup>) en 2050. Selon ce scénario central, cette croissance devrait être plus importante entre 2024 et 2030 (+3,1% par an en moyenne) puis devrait légèrement diminuer à +3,0 % par an en moyenne entre 2030 et 2040 et à +2,9 % par an en moyenne entre 2040 et 2050 [12].

Cette projection de croissance du trafic aérien commercial est représentative des trajectoires envisagées par le secteur au niveau mondial, dont une synthèse est disponible dans la figure ci-dessous (Figure 14). La trajectoire représentée dans la Figure 13 (correspondant à la légende « W2050 CENTRAL (WITH COVID19 IMPACTS) ») se trouve ainsi dans la moyenne des projections disponibles. A noter que la plupart de ces projections ne prennent pas en compte la baisse ponctuelle du trafic liée à la COVID19. Se référer au paragraphe 2.2 concernant la mise à jour de ces scénarios suite à la pandémie.

### Trajectoires prévisionnelles de croissance du trafic aérien (aviation commerciale) au niveau mondial dans la littérature en milliards de RPK

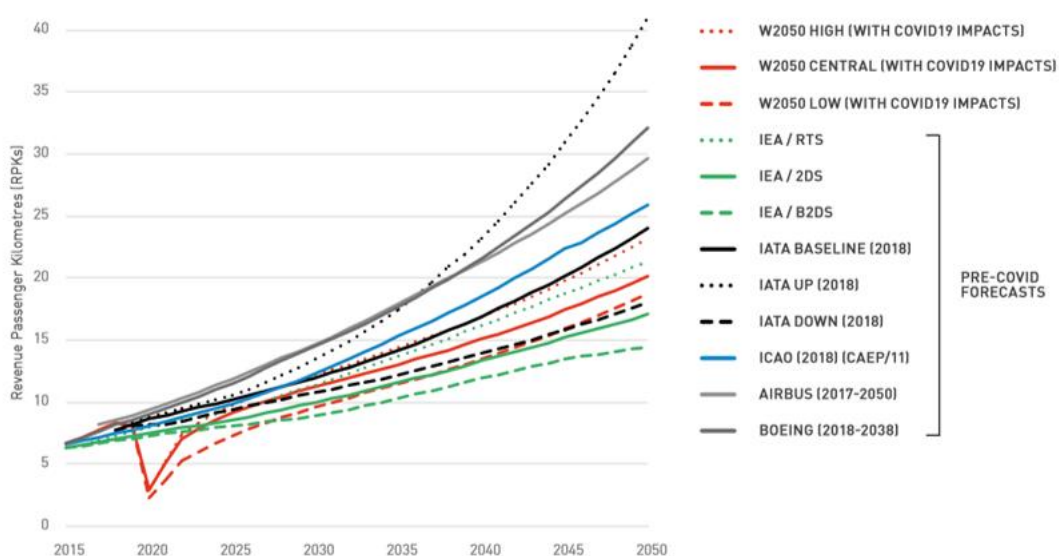


Figure 14 : Trajectoires prévisionnelles de croissance du trafic aérien au niveau mondial dans la littérature [12]

<sup>9</sup> Le « Revenu Passenger Kilometer » (ou passagers-kilomètres-payants) est un indicateur correspondant à la 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.

La croissance planifiée du trafic aérien commercial n'est pas identique en fonction des régions du monde considérée. La Figure 15 illustre la variation régionale de croissance, avec une **plus forte croissance attendue pour les régions de l'Asie Pacifique et du Moyen-Orient** (régions où le trafic est actuellement en très forte augmentation) ; et une croissance plus faible pour l'Europe et l'Amérique du Nord où le trafic aérien commercial est historiquement plus développé.

**Trajectoires régionales de la croissance du trafic aérien (aviation commerciale) par continent selon le scénario central Waypoint 2050 (en RPK, index 100 en 2019)**

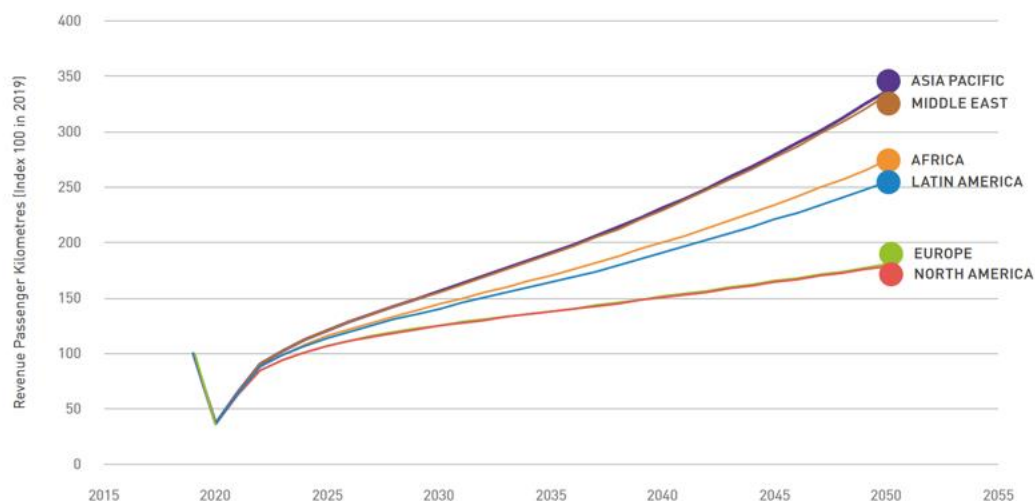


Figure 15 : Trajectoires régionales de la croissance du trafic aérien commercial par continent selon le scénario central Waypoint 2050 (en RPK ou passagers payants transportés) [12]

Finalement, de manière cohérente pour l'Europe, les différents scénarios des acteurs du secteur prévoient une croissance du trafic aérien commercial au niveau de la France, avec une **estimation du nombre de passagers transportés en France entre 112,8 et 131,2 millions en 2037** contre 89,4 millions en 2017 (Figure 16). Pour plus de précisions sur ces éléments, se référer à la description des scénarios dans la Partie 4.4.5.

		PASSENGERS	US \$ GDP	JOBS
2017		89.4 m	\$105.3 bn	1.1 m
	Current Trends	131.2 m	\$154.6 bn	1.4 m
	Upside	141.9 m	\$167.1 bn	1.6 m
	Downside	112.8 m	\$132.8 bn	1.2 m

Figure 16 : Projection du nombre de passagers (à gauche en millions) transportés en France en 2037 [5]

### **Le déploiement de nouvelles activités aéronautiques qui viennent soutenir cette croissance prospective**

Par ailleurs, de nouveaux types d'aéronefs sont en cours de développement et commencent à être expérimentés dans le monde. Leur commercialisation générera une nouvelle activité de transport aérien, ce qui accompagnera cette croissance de trafic prévue.

Les premiers d'entre eux sont les aéronefs eVTOL, pour « Electric Vertical Take-Off and Landing » (littéralement: décollage et atterrissage verticaux et électriques). Le déploiement de ces appareils électriques, dont environ 170 prototypes sont actuellement en cours de développement dans le monde, pourrait aboutir à la création de réseaux de taxis volants dans 60 à 90 villes (pour un total de 40 000 à 60 000 eVTOL) à l'horizon 2035. Ces villes seront en majorité des mégapoles congestionnées situées en Amérique et en Asie. Les premiers essais en France ont eu lieu en été 2021 [42].

Le marché de la livraison par drones volants devrait également connaître une croissante florissante dans les prochaines années à l'échelle mondiale du fait de la hausse de la demande en livraison quasi-instantanées et des besoins associés à la logistique du dernier kilomètre ou à l'approvisionnement de zones enclavées ou isolées en cas de crises. Le marché mondial des livraisons par drones volants devrait ainsi atteindre 4,95 Mds de dollars en 2030 [43].

La prochaine décennie devrait enfin voir l'essor du tourisme spatial, porté par les annonces de SpaceX qui prévoit d'envoyer des touristes dans l'espace [44], mais aussi d'autres sociétés comme Virgin Galactic et Blue Origin qui sont en train de développer des appareils capables d'envoyer des passagers privés juste au-dessus de la frontière de l'espace pendant quelques minutes [45].

Ces nouveaux appareils ne voleront pas tous à la même altitude que les avions, mais contribueront à remplir l'espace aérien, notamment à basse et moyenne altitude. Ils consommeront également de l'énergie pour pouvoir voler, ce qui engendra des émissions de GES supplémentaires par rapport à aujourd'hui.

## 2.1.2. Les enjeux sociaux comme causes et conséquences du développement du secteur

### 2.1.2.1. L'aviation, une activité principalement générée par les individus les plus aisés

#### Une activité pratiquée par une minorité de la population mondiale

Le transport aérien est une activité qui est caractérisée par de fortes inégalités sociales. En effet, 11 % de la population mondiale voyage en avion chaque année et entre 2 et 4 % a pris au moins un vol international en 2018 [46]. Il convient donc de noter que tous les individus ne volent pas, que tous ceux qui volent ne le font pas à la même fréquence, et que ces vols ne sont pas tous équivalents en termes de distance parcourue.

Alors que l'IATA avance en 2018 que sur la planète chaque individu volerait en moyenne tous les 22 mois [47] en 2017 (ce qui est cohérent à la moyenne du trafic mondial de 4,5 milliards de passagers pour 7,7 milliards d'habitants, en 2019, soit 0,6 vol par an et par habitant), ce chiffre moyenné doit être mis au regard d'une annonce de Boeing en 2017 « moins de 40 % de la population mondiale a déjà pris un simple vol » [48] (voir aussi Tableau 2). Ainsi, seule une minorité de la population mondiale voyage en avion. Le Tableau 2 ci-dessous montre aussi que, parmi la population qui prend l'avion, la moyenne est de 5 vols par an et par voyageur.

#### Des voyageurs concentrés dans les pays développés

Il y a une forte corrélation positive entre le niveau de vie et la fréquence des voyages en avion. Ainsi, alors que seulement 0,7 % de la population des pays à plus faibles de niveau de revenus prend l'avion au moins une fois par an, cette proportion monte à 40 % pour les pays les plus riches [46].

Tableau 2 : Part de la population qui prend l'avion au moins une fois par an en fonction du niveau de richesse du pays considéré [46]

	Population dans la catégorie (en millions)	Nombre de passagers dans la catégorie (en millions) *	Nombre de passagers par individu dans la population**	Population qui vole (en %)	Population qui vole (en millions) ***
Très faible revenu	705	23	0,03	0,7 %	4,9
Faible revenu	3 023	454	0,15	3 %	90,7
Revenu élevé	2 656	1 313	0,49	10 %	265,6
Revenu très élevé	1 210	2 442	2,02	40 %	484,0
Total	7 594	4 233		11,1 %	845,2

\* un individu qui prend 2 fois l'avion dans l'année compte pour 2

\*\* ratio entre le nombre de passagers et la population

\*\*\* un individu qui prend 2 fois l'avion dans l'année compte pour 1

La demande est également très concentrée parmi les pays. L'Amérique du Nord représente à elle seule 26% du trafic aérien (en RPK ou passagers payants transportés). Les autres marches du podium sont complétées par l'Europe avec 23 % du trafic aérien et par l'Asie-Pacifique qui en concentre 32 %. Ces inégalités de trafic se traduisent en un impact environnemental inégal : les émissions liées au trafic aérien des Etats-Unis sont actuellement supérieures à celles des 10 pays suivants cumulés [46].

#### Une population de voyageurs aériens très hétérogène, où les voyageurs fréquents ont un impact environnemental bien plus important que les voyageurs occasionnels



1% de la population mondiale est responsable de plus de 50 % des émissions de gaz à effet de serre liées aux vols commerciaux et privés [46].

A l'intérieur même des pays développés, ce sont les classes sociales les plus aisées qui ont l'usage le plus élevé de l'avion. 20 % des Français n'ont jamais pris l'avion [49] alors que 36 % le prennent au minimum une fois par an [50]. Environ 50 % des déplacements (privés et commerciaux) en avion en France était en 2008 le fait des 20 % des voyageurs avec les revenus par unité de consommation les plus élevés [51]. En Suède, 4 % des voyageurs les plus fréquents représentent 28 % des vols. Leur impact est démultiplié par le fait qu'ils sont aussi plus régulièrement consommateurs de la classe Affaires, ce qui suppose une empreinte carbone 5 à 15 fois plus importante selon l'agencement des cabines. Aux Etats-Unis, 53 % des adultes ne prennent pas l'avion, 35 % le prennent entre 1 à 5 fois et 12 % le prennent plus de 6 fois en 2018. Pour les voyageurs les plus fréquents, le nombre de vols par an s'élève à 600, ce qui implique quasiment un aller-retour par jour [46].

En particulier, les utilisateurs d'avions privés (qui font souvent partie des classes sociales les plus aisées) ont un impact climatique très important. Selon un rapport de Transport & Environnement, les émissions de CO<sub>2</sub> des jets privés européens ont augmenté très fortement ces dernières années, avec une augmentation de +31 % entre 2005 et 2019 contre +25 % pour l'aviation commerciale européenne (en ce malgré la baisse du trafic lié à l'aviation privée en 2019 due au Brexit) [52].

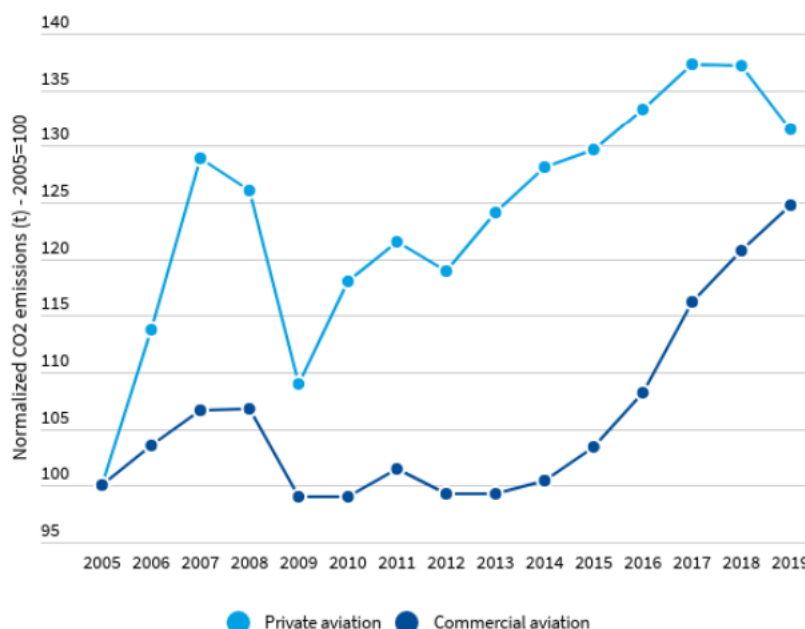


Figure 17 : Evolution des émissions des aviations privées et commerciales européennes [52]

Le rapport estime également que les jets privés génèrent 5 à 14 fois plus d'émissions de GES par passager que les avions commerciaux [52].

L'aviation reste donc aujourd'hui un moyen de transport réservé à une faible proportion de la population mondiale, faisant le plus souvent partie des catégories sociales les plus aisées des pays à haut revenu par habitant. En 2016, les catégories socioprofessionnelles les plus favorisées représentaient la moitié des passagers métropolitains en France [53].

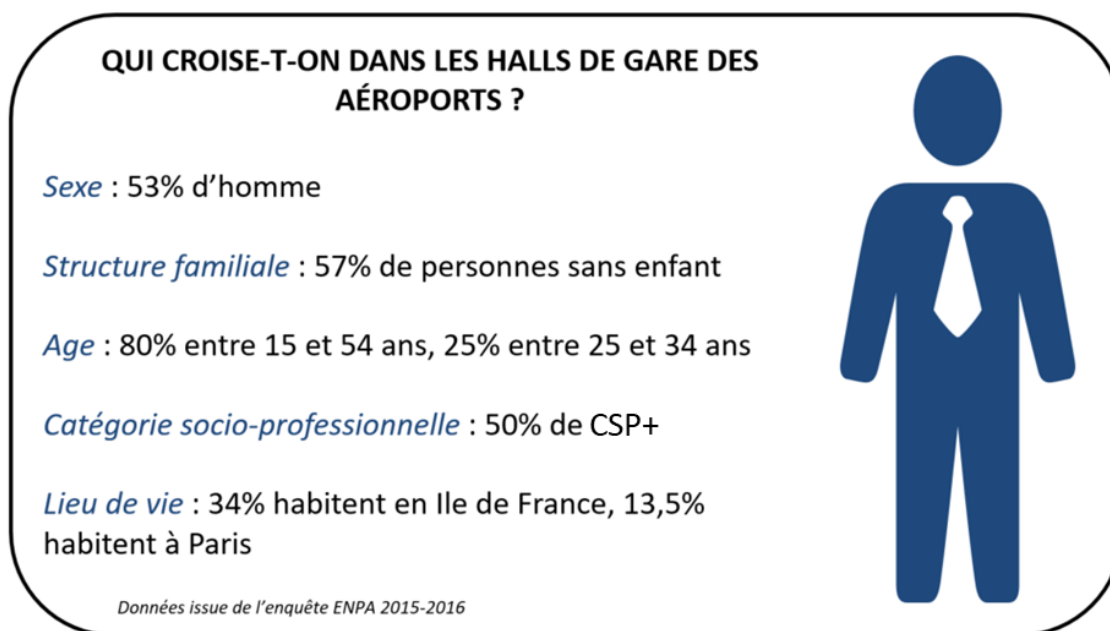


Figure 18 : Carte d'identité du passager aérien en France en 2016 [53]

### 2.1.2.2. Une démocratisation relative de l'aviation ces dernières années

#### **La démocratisation de l'avion : un phénomène relativement croissant ces dernières années permis par le développement des offres à bas-coûts**

Dans l'ouvrage Géographie Humaine, Pierre Zembri identifie depuis les années 1960 une révolution qui bouleverse le monde du transport et qui est liée au développement du transport aérien. Cette révolution a été permise par l'essor du moteur à réaction qui a entraîné la démocratisation de ce mode de transport jusqu'alors réservé aux classes les plus aisées et aux opérations militaires. Cette démocratisation est récente, comme l'illustre le fait que le premier président américain à se déplacer à bord d'un avion est F.D. Roosevelt en 1943 pour se rendre à Casablanca. Depuis les années 60, on assiste à une diminution importante des temps de trajet, une augmentation des capacités d'emport des avions et une diminution des prix des billets [28].

Par ailleurs, un nouveau phénomène plus récent participe à amplifier la démocratisation de l'accès à l'aviation : il s'agit de l'apparition des compagnies « low-cost » et de leur modèle permettant de compresser les prix. Ce modèle, né aux Etats Unis dans les années 70, s'est imposé en Europe à partir des années 1990. La part de ces vols a significativement augmenté ces dernières années, en augmentant leur part de marché de 6% des vols moyen et court-courrier en 2002 à 35 % en 2015. [54]

#### **Néanmoins, la hausse de l'usage de l'avion en France est due à l'intensification de l'usage de ce mode de transport par les classes les plus aisées et non à la démocratisation de celui-ci**

Ainsi, en 2008, moins de 15 % des personnes des 4 derniers déciles de revenus avaient pris l'avion durant l'année écoulée, contre 49 % des 10% les plus riches, et 64 % du 1 % le plus riche. De même, en 2008, 50 % des cadres avaient pris l'avion dans l'année contre 11% des ouvriers, ce qui représente une évolution faible par rapport à 1993, où 47 % des cadres et 7 % des ouvriers avaient pris l'avion. La hausse de l'usage de l'avion au sein de la population française est plus fortement due à la hausse du nombre de cadres qu'à un meilleur accès des classes populaires à l'avion [55].

En termes de nombre de voyages, les 7 premiers déciles de revenus ne représentent que 40 % des voyages réalisés en avion. Cette proportion est stable de 1970 à aujourd'hui. Le dernier centile occupe au sein des passagers une place 3 fois plus élevée que celle qu'il occupe dans la population générale. Les programmes de fidélité ont développé la mobilité de ceux qui sont déjà les plus mobiles et diminuent le coût du transport aérien pour les voyageurs les plus aisés. A la place d'une massification, on assiste plutôt à une intensification du trafic pour les voyageurs existants avec une multiplication des courts séjours dans des lieux plus éloignés [55]<sup>10</sup>.

Ainsi, si prendre l'avion s'est légèrement démocratisé, la répartition des trajets n'a que peu évolué, les classes aisées intensifiant leur usage de l'avion au moment où les classes populaires y accèdent. En

<sup>10</sup> L'étude montre ainsi une croissance entre 1981 et 2008 de l'indice de Gini du nombre de voyages longue distance réalisés.

superposition à ces deux premiers phénomènes, on observe également une démocratisation ségrégative du transport aérien avec une différenciation sociale des usages et de l'intensité des usages. Les voyages professionnels en avion ne concernent que les salariés les plus aisés et la figure du touriste est quant à elle touchée par une différenciation symbolique importante avec la vision du touriste comme « l'idiot du voyage » [55].

### **2.1.3. Le fret aérien, un moyen de transport de marchandises à haute valeur ajoutée, urgentes ou périssables**

Le fret aérien présente de nombreux avantages. En effet, il est un moyen de transport :

- Permettant de transporter de manière considérée comme sûre des marchandises fragiles, précieuses ou dangereuses ;
- Extrêmement rapide ;
- Qui permet d'éviter de nombreuses frontières (et donc de réduire les coûts financiers et administratifs associés à celles-ci) ;
- Qui permet d'accéder à des endroits inaccessibles par d'autres moyens [56].

Cependant, il s'agit d'un moyen de transport cher.

Par conséquent, les marchandises qui voyagent par avion sont des marchandises à haute valeur ajoutée (comme de l'équipement électronique, des œuvres d'art ou des produits de luxe), des biens périssables (certains produits agricoles comme les fleurs par exemple, ou des produits pharmaceutiques) ou encore des marchandises qui sont attendues à destination de manière urgente (par exemple des masques dans le cadre de la pandémie de Covid-19, ou bien des prototypes ou des échantillons avant une campagne de promotion commerciale) [57].

### **2.1.4. L'aviation, un vecteur de mondialisation au service de la cohésion du territoire national et du développement économique des territoires périphériques en France**

#### **Le principe de continuité territoriale, un principe défini dans les années 1970 qui a été traduit par des mesures concrètes à destination des Outre-mer**

D'un point de vue législatif, le principe de continuité territoriale a été défini dans les années 1970 pour désenclaver la Corse. Il s'agit d'un principe de service public qui doit renforcer la cohésion entre les territoires d'un même Etat en compensant l'éloignement, l'enclavement ou un accès difficile. En 2002, ce principe a été élargi aux habitants des Outre-mer par la loi programme pour l'Outre-mer de 2003. Dans le cadre de la Polynésie une disposition supplémentaire est prise en 2007 pour assurer la continuité territoriale entre les communes d'une même collectivité territoriale sans tenir compte de l'espace maritime qui existe entre ces dernières. Pour la Corse, le principe de continuité territoriale est appliqué au transport aérien dès 1979 pour les lignes « bord à bord ». Cela sera ensuite étendu aux lignes reliant l'île à la capitale. Dans un rapport du Sénat sur les Outre-mer paru en 2009, le secteur aérien est reconnu comme secteur essentiel pour le développement économique de ces territoires. A ce titre, plusieurs aides existent pour renforcer la mobilité aérienne [58]. Depuis septembre 2002, le passeport mobilité permet d'assurer la gratuité d'un voyage par an vers la Métropole pour les jeunes d'Outre-mer qui doivent y suivre des études supérieures ou des formations professionnelles. Les Outre-mer bénéficient également d'une dotation de continuité territoriale qui dépend du nombre d'habitants, de la distance par rapport à Paris et du niveau de trafic aérien. Elle doit permettre de financer une aide forfaitaire pour diminuer le prix d'un billet aller-retour par an pour 200 000 résidents ultramarins.

#### **L'avion, un mode de transport soutenu au titre de la cohésion du territoire national**

En septembre 2019, le Sénat a publié un rapport sur la contribution du transport aérien au désenclavement et à la cohésion des territoires. Le rapport constate tout d'abord que 1 million de Français vivent à plus de 45 minutes d'un accès à l'autoroute, d'une gare TGV ou d'un aéroport. 10 millions de Français n'ont accès qu'à un seul de ces modes de déplacement. A ce titre, l'avion est perçu comme un outil pertinent pour rejoindre Paris pour des zones où le temps de trajet en train ou en voiture est de plus de 4h. Les lignes aériennes peuvent également permettre de relier les métropoles régionales de manière plus efficace que le rail. Pour ces déplacements, les sénateurs soulignent qu'il est possible d'utiliser des avions à turbopropulseurs plus économes en kérosène de 30 %. Pour les distances de plus de 500km et des capacités de plus de 50 personnes, l'aviation régionale représente également une opportunité de développer des filières de biocarburants ou des solutions hybrides [59].

#### **Un mode de transport lié au développement économique des régions périphériques en France**

Selon des travaux synthétisés par Y. Crozet et P. Chiambaretto rapportés dans le rapport du Sénat [11], une augmentation de 10 % du transport aérien entraîne une hausse de 0,1 à 0,5% du PIB, une hausse de 4,7 % des Investissements Directs Etrangers, une hausse de 0,3 % à 0,7 % des salaires et une hausse de 3,9



% de la démographie locale. Cependant, il est à noter que le lien entre transport aérien et croissance économique est double et ainsi il est difficile d'estimer la part de la croissance économique qui incite à l'augmentation du transport aérien et la part de l'augmentation du transport aérien qui favorise l'économie. Il existe un cercle d'influence positive entre ces deux grandeurs. Le sens de la causalité dépend notamment de la typologie du territoire. En général, dans les régions périphériques, c'est le transport aérien qui attire la croissance économique et non pas l'inverse [59].

Ces constats théoriques sont en général corroborés par les témoignages d'acteurs locaux, rencontrés ici à Quimper, Aurillac et Rodez. Les liaisons aériennes permettent à la fois le déplacement des salariés mais également ceux des clients ou des touristes.

### **L'aviation, un vecteur de mondialisation à l'échelle globale**

A une échelle plus globale, le développement du transport aérien contribue fortement à la mondialisation des activités humaines et au changement d'échelle de certaines activités économiques, notamment le tourisme, puisque le trafic aérien permet d'établir des connexions entre des espaces qui étaient jusque-là tout à fait étanches les uns des autres. En retour, la mondialisation entretient et supporte le développement du secteur aérien en créant de nouveaux besoins et de nouvelles opportunités.

## **2.2. Un secteur bouleversé en 2019 par la pandémie de COVID-19**

### **2.2.1. Une forte baisse de l'activité aérienne entre 2019 et 2021**

#### **Une demande en trafic de passagers et de marchandises en forte baisse en 2020 à l'échelle mondiale**

Sur l'ensemble de l'année 2020, les demandes de vols internationaux et domestiques (en termes de passagers-kilomètres payants) ont été respectivement inférieures de 76 % et de 49 % par rapport à 2019 à l'échelle mondiale. Ces baisses sont les plus fortes jamais enregistrées dans l'histoire de l'aviation [60]. L'offre de sièges par les compagnies aériennes a chuté de 51 % et le nombre de passagers a quant à lui diminué de 60 % en 2020 par rapport à 2019, ce qui représente une baisse de 2,89 milliards de passagers. La baisse du transport de fret a été nettement moins importante : -9,2 % en volume [61], ce qui constitue cependant le plus fort taux de baisse annuelle de l'histoire du fret aérien [62]. Ces évolutions sont d'autant plus remarquables qu'elles sont survenues soudainement et s'inscrivent en rupture avec la tendance historique et les prévisions sur lesquelles se basaient les acteurs.

#### **City pair connections in April 2019**

Source: IATA Economics, using data under license from Flight Radar 24



#### **City pair connections in April 2020**

Source: IATA Economics, using data under license from Flight Radar 24



Figure 19 : Impact de la COVID-19 sur le nombre de connections entre ville – Comparaison entre le mois d'avril 2019 et avril 2020 [83]

**Global passenger and cargo tonne km growth**  
Source: IATA Economics, using data from IATA Statistics

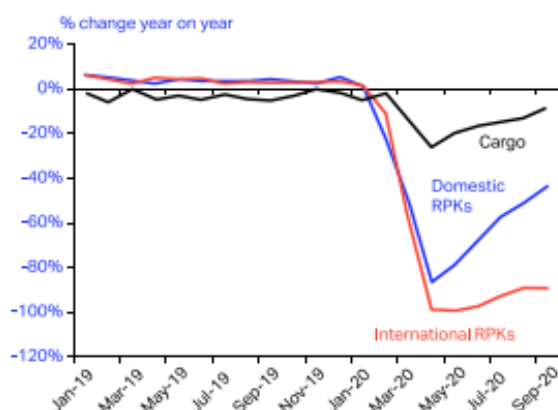


Figure 20 : Impact de la COVID-19 sur la croissance du volume de passagers-kilomètres-payants et de tonne.km [83]

### **Une crise qui a entraîné des pertes économiques historiques pour le secteur en 2020**

La réduction de la demande de transport de passagers a entraîné des pertes économiques historiques pour les compagnies aériennes et les aéroports. Le manque à gagner des compagnies aériennes est estimé à environ 391 milliards de dollars et celui des aéroports à 111,8 milliards de dollars en 2020 (par rapport à un scénario tendanciel de croissance du trafic entre 2019 et 2020) [61].

Les compagnies aériennes ont donc dû réduire drastiquement leurs coûts pour faire face. Elles y sont parvenues à hauteur de 45,8 % contre une diminution de 70 % des bénéfices. Les autres coûts étant des coûts contraints, beaucoup d'entreprises se retrouvent en grandes difficultés financières avec des problèmes de liquidité et de trésorerie, accentué par le fait que de nombreuses compagnies aériennes ne sont que peu ou pas rentables en temps normal [63]. La situation d'Air-France-KLM est particulièrement frappante avec un recul de son chiffre d'affaires de 59 % et une perte nette de 7,1 milliards d'euros. Le recul du trafic passagers a été de l'ordre de 67 % [64].

Dans une moindre mesure, les constructeurs aéronautiques sont également affectés. Airbus a ainsi annoncé une perte de 1,13 milliards d'euros et Boeing de 11,9 milliards d'euros pour l'année 2020. La relative bonne santé économique d'Airbus a surtout été permise par la bonne tenue de ses livraisons d'avions. En 2020, les reports de livraison s'accumulent pour les années à venir ce qui peut entraîner des difficultés à plus long terme puisque 80 % du paiement s'effectue à la livraison [65].

Pour les constructeurs aéronautiques, la crise a par ailleurs été l'occasion d'une accélération de changements déjà engagés avec notamment la fin des quadrimoteurs dans l'aviation commerciale. Airbus avait arrêté la production d'A380 depuis février 2019 et Boeing a annoncé en juillet 2020 la fin de la production des Boeing 747 pour 2022. Ces deux entreprises ont également annoncé des suppressions de postes (15 000 pour Airbus et 30 000 pour Boeing) [15]. Plus de 1900 livraisons d'appareils en 2020 et 2021 ont été annulées ou repoussées du fait des difficultés financières des compagnies aériennes, qui ne disposent plus des moyens à court terme d'agrandir leurs flottes. Ces chiffres sont à mettre en regard avec les performances habituelles des constructeurs. En 2019, Airbus a livré 863 avions et Boeing 345 [66]. Les livraisons des prochaines années seront donc essentiellement liées au renouvellement des flottes actuelles [67].

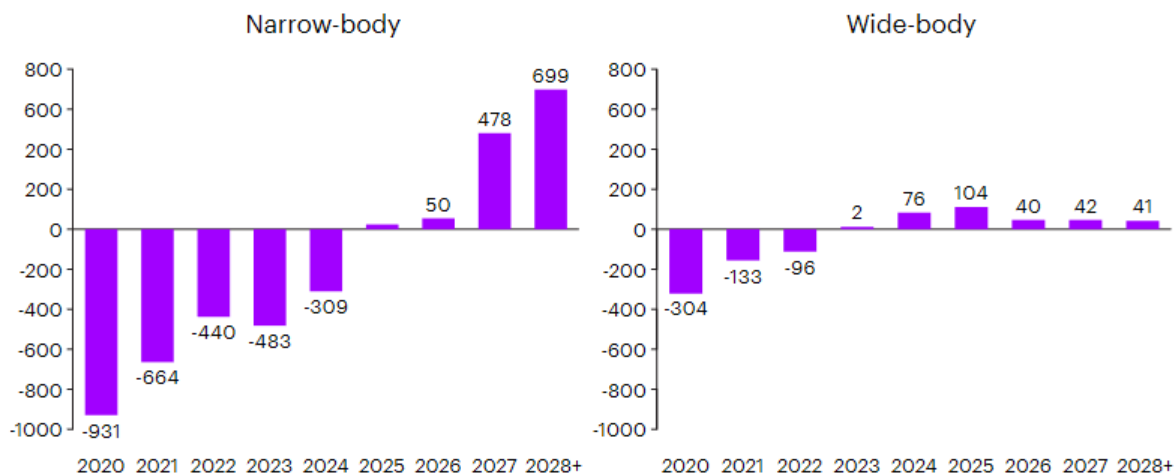


Figure 21 : Modification du calendrier de livraison des avions de passagers (septembre 2020 contre mars 2020) [88]

Les motoristes et équipementiers ont également souffert des annulations et des reports de livraison ainsi que du manque de contrats de soutien à l'heure de vol. Les sous-traitants industriels ont subi de plein fouet la baisse de la demande des grands donneurs d'ordres du secteur [15].

10 millions d'emplois directs et 65 millions d'emplois indirects étaient menacés dans le monde en 2020 [68]. En France, ce sont 13 000 postes qui étaient supprimés ou en cours de suppression en juillet 2020 [69], date à laquelle de 8 000 à 10 000 ingénieurs étaient sans mission en Occitanie [15]. Un risque de faillite était également envisagé pour 200 aéroports en Europe du fait du manque à gagner des redevances aéroportuaires et de la baisse d'activité notamment des infrastructures commerciales [70].

## 2.2.2. Une demande qui pourrait retrouver son niveau de 2019 en 2024 en Europe, et plus rapidement dans le reste du monde

### Une demande qui pourrait retrouver son niveau de 2019 en 2024 en Europe

L'ATAG a revu en 2020 ses scénarios de prévision de trafic en intégrant l'impact du Covid et une reprise prévue du trafic en 2024. La Figure 22 illustre les différences de trajectoires prévisionnelles suite à la Covid-19, avec une réduction de 16 % du trafic sur le scénario central en 2050 entre la prévision pré-covid et post-covid.

### Comparaison des prévisions du trafic aérien mondial (aviation commerciale) pré- et post-Covid, en milliards de RPK



Figure 22 : Comparaison des prévisions du trafic aérien mondial pré- et post-Covid[12]

### Une reprise du secteur en 2022

En Mars 2022, l'IATA confirme les prévisions de reprise du trafic en 2024 au même niveau qu'en 2019 via un communiqué de presse [71]. Les étapes de la reprise estimée sont détaillées dans le Tableau 3, avec une reprise estimée plus rapide en Amérique du nord et Amérique centrale qu'en Asie-Pacifique. Selon ces prévisions, le trafic devrait donc bien retrouver son niveau de 2019 en 2024 pour l'Europe.

Tableau 3 : Estimation de la reprise de trafic aérien par rapport 2019 entre 2022 et 2025 selon les régions du monde [71]

Nombre de passagers par rapport à 2019	2021	2022	2023	2024	2025
Ensemble de l'industrie	47 %	83 %	94 %	103 %	111 %
International	27 %	69 %	82 %	92 %	101 %
Intérieur	61 %	93 %	103 %	111 %	118 %
Asie-Pacifique	40 %	68 %	84 %	97 %	109 %
Europe	40 %	86 %	96 %	105 %	111 %
Amérique du Nord	56 %	94 %	102 %	107 %	112 %
Afrique	46 %	76 %	85 %	93 %	101 %
Moyen-Orient	42 %	81 %	90 %	98 %	105 %
Amérique du Sud	51 %	88 %	97 %	103 %	108 %
Amérique centrale	72 %	96 %	102 %	109 %	115 %
Caraïbes	44 %	72 %	82 %	92 %	101 %

La tendance Europe est confirmée par les données de trafic aérien en France en février 2022, avec un trafic observé à 63,4 % de celui de 2019, dont un trafic sur les liaisons Métropole/Outre-Mer à 85 % des niveaux de 2019 sur la même période [72].

Par ailleurs, en mai 2022, Airbus reprend à la hausse ses activités grâce à un carnet de commande de plus de 7000 avions, ce qui le pousse à augmenter sa cadence de production de 50 % entre 2022 et 2024 et à ouvrir une nouvelle ligne de production. 15 000 nouvelles embauches sont ainsi prévues pour l'année 2022, ce qui illustre une vive reprise d'activité du secteur en sortie de la pandémie [73]

#### **Une reprise qui pourrait être plus rapide pour les vols liés à des motifs privés et aux loisirs et aux vacances que pour les vols professionnels**

La reprise pourrait notamment être différente en fonction des motifs de voyage (loisirs et vacances, privés, professionnels). D'une manière générale, les vols professionnels mettent plus de temps à retrouver leur niveau d'avant crise comme cela avait déjà pu être constaté après la crise de 2008-2009. A cette époque, les vols professionnels avaient mis 5 ans à retrouver un niveau d'avant crise, contre 2 ans pour les voyages internationaux liés aux loisirs, aux vacances ou à des motifs privés.

Il semblerait que cette tendance soit encore vérifiée dans le cadre de la crise sanitaire actuelle. A l'inverse des vols professionnels, les vols liés à des motifs personnels ou aux loisirs et aux vacances dépendent des envies des passagers et voyager fait partie des loisirs qui prennent de plus en plus d'importance avec l'élévation du niveau de vie. En Chine, les vols domestiques sont par exemple revenus quasiment à leur niveau de 2019, notamment pendant les périodes de congés. Pour les vols professionnels, la pandémie de COVID-19 a rebattu les cartes vis-à-vis de ce qui est considéré comme nécessaire ou non. Le développement de nouveaux modes de travail (télétravail, augmentation du recours aux réunions en distanciel) devrait conduire à réduire la demande liée aux déplacements professionnels [74].

#### **Le transport aérien de fret, un secteur impacté positivement par la crise sanitaire et qui devrait continuer à croître fortement durant les prochaines années en lien avec la croissance du e-commerce**

Depuis quelques années, la croissance du fret aérien est liée à celle du commerce en ligne (ou e-commerce) international. En effet, les consommateurs en ligne attendent le même niveau de service pour leurs achats domestiques ou à l'étranger. Ils sont en particulier particulièrement attentifs à la rapidité et à la prévisibilité des délais de livraison, et souhaitent disposer d'une forte visibilité sur ceux-ci [56] [75]. Le transport aérien de marchandises est une des solutions de transport les plus à même d'assurer cette forte qualité de service, notamment du point de vue de la vitesse de livraison.

Les volumes de marchandises achetées en ligne ont connu une très forte croissance (tant en valeur qu'en volume) depuis 2005 (en moyenne +20 % par an selon Euromonitor International cité dans [56]). Le fret aérien a également connu une forte croissance, puisque le volume annuel de marchandises transportées, combiné aux distances parcourues, a été multiplié par 14, passant de 15,5 millions de tonnes-kilomètres en 1970 à plus de 221 millions de tonnes-kilomètres par an en 2019 (Figure 5) [27].

Avant la crise sanitaire, la majorité (54 %) du fret aérien était transporté dans les soutes des avions de transport de passagers [75]. L'IATA prévoyait en 2019 que le trafic aérien de marchandises devait croître d'environ 4 % par an pendant les 20 prochaines années, en lien avec la croissance du commerce en ligne [76].



Cependant, le transport de fret aérien a aussi été impacté par la crise sanitaire. Durant celle-ci, les ventes de commerce en ligne ont fortement augmenté, et la demande fret aérien a donc connu une forte croissance (croissance également liée aux besoins de transport de médicaments et d'équipements de protection comme les masques). Ainsi, en 2020, seules 5 compagnies aériennes ont déclaré des profits au niveau mondial, et ces compagnies étaient toutes des transporteurs de fret (AirBridgeCargo, Atlas Air, Cargofly, Cargolux, et Kalitta)[77].

La forte croissance du commerce devrait selon les prévisions se poursuivre après la crise sanitaire. Cette croissance devrait ainsi soutenir celle du fret aérien qui devrait donc s'avérer supérieure aux prévisions de l'IATA avant la crise sanitaire [75], à la condition que les transporteurs aériens de fret s'adaptent aux contraintes du e-commerce, notamment en numérisant leurs services et en gagnant en efficacité (diminution des coûts de transaction, optimisation des processus...) [56]. A noter que certains acteurs du e-commerce commencent à se doter de leur propre flotte aérienne pour assurer eux-mêmes tout ou une partie de la logistique de leurs ventes. Amazon a ainsi agrandi sa flotte aérienne en 2020 et en 2021, et pourrait selon certaines prévisions posséder une flotte de 85 appareils en 2022 (en location ou en propre) [78].

### **2.2.3. Le plan de relance français, un plan massif de soutien assorti de conditions**

#### **Un secteur soutenu par un plan massif de l'Etat en France**

Afin de venir en aide aux compagnies aériennes, plusieurs Etats ont mis en place des plans de relance. A l'heure actuelle, l'IATA estime que le secteur a reçu 160 milliards de dollars d'aide mais que 70 à 80 milliards de dollars supplémentaires sont nécessaires pour assurer l'avenir du transport aérien [79].

En France, le Plan de soutien à l'aéronautique, conçu dans le cadre du Plan « France Relance », a prévu 15 milliards d'euros d'aides, d'investissement, de prêts et de garanties afin de ne pas mettre en péril « le savoir-faire de cette industrie d'excellence » ainsi que pour ne pas mettre en danger ses capacités d'innovation et de rebond [80]. En parallèle, le secteur a également bénéficié du chômage partiel mis en place pour l'ensemble des secteurs économiques. Dans le cas très précis d'Air France, l'entreprise a aussi bénéficié d'une recapitalisation de la part de l'Etat, qui possède 28,6 % d'Air-France KLM au 31 décembre 2021 [81] contre 14,3 % en avril 2021 [82]. La compagnie avait déjà bénéficié au printemps 2020 de 7 milliards d'euros d'aide, partagé entre prêts directs et garanties sur des prêts bancaires. Au printemps 2021, l'Etat lui a accordé au moins 5 milliards supplémentaires.

#### **Un plan de soutien qui est conditionné à des investissements dans la recherche et le développement de technologies propres et à des contreparties environnementales**

Selon le gouvernement, le Plan de soutien à l'aéronautique s'inscrit dans la perspective de la transition écologique du secteur aérien. L'objectif final de ce plan est de produire en France les avions et les hélicoptères « propres » de demain pour rester une nation leader de l'aéronautique dans le monde. Pour cela, l'Etat souhaite :

- Répondre à l'urgence en soutenant les entreprises en difficulté et en protégeant les salariés par des prêts garantis et les dispositifs d'activité partielle. Il met également en place des garanties à l'export pour éviter les annulations ou les reports de commande ;
- Investir dans les PME (Petites et Moyennes Entreprises) et les Entreprises de Taille Intermédiaire (ETI) pour favoriser le développement de la filière mais également pour garantir un tissu économique de fournisseurs et de sous-traitants dense et de qualité ;
- Investir dans la recherche et développement pour faire de la France un pays avancé en matière de technologie « propre », ce qui permettrait de mener la transition écologique du secteur sur un front plus large en pesant sur une large partie de la flotte mondiale. Actuellement, Airbus représente 50 % du marché mondial et Safran motorise 70 % des avions courts et moyens courriers [80]

Le gouvernement conditionne donc son aide financière au groupe Air France aux contreparties suivantes [16] :

- « Permettre le redressement de la compétitivité du groupe à travers un plan que présentera la direction de l'entreprise pour assurer la soutenabilité économique et financière du Groupe ;
- Plus spécifiquement concernant Air France, prévoir des réformes structurelles sur la maîtrise des coûts et des efforts de productivité pour l'aligner sur les meilleurs standards internationaux, notamment à travers la négociation de nouveaux accords avec les organisations représentatives du personnel ;
- Réviser le périmètre du marché domestique avec la réduction des vols régionaux, dès lors qu'il existe une alternative ferroviaire inférieure à 2h30, tout en préservant les correspondances ultramarines et internationales ;

- Réduire de -50 % les émissions de CO<sub>2</sub> des vols métropolitains au départ d'Orly et de région à région d'ici la fin 2024 et moderniser la flotte moyen et long-courrier, notamment afin de diminuer son impact écologique, et aussi à travers l'objectif de 2 % de carburant alternatif durable à incorporer dans le réservoir des avions dès 2025. »

Par ailleurs, en contrepartie de ces aides, la Commission Européenne, qui a approuvé le Plan de soutien à l'aéronautique, a demandé en 2020 à Air France de céder 24 créneaux d'atterrissage et de décollage par jour à Orly, ce qui représente une diminution de -7 % de ses capacités [82]. Ce nombre a été revu à la baisse à 18 créneaux après négociations. Cette contrainte imposée à Air France a anticipé la mesure votée dans le cadre de la loi Climat résilience d'interdiction sous certaines conditions des vols domestiques quand une alternative en train existe en moins de 2h30 [83].

Ce plan de relance a été rédigé en collaboration avec les grands acteurs du secteur aérien, notamment ceux de la construction aéronautique qui s'engagent à renforcer les relations entre les acteurs du secteur, à améliorer sa compétitivité tout en menant la transition écologique, notamment par des objectifs communs de réduction de l'empreinte carbone. L'engagement a été pris de mettre sur le marché un avion basse consommation avec 10 ans d'avance sur ce qui était initialement prévu, aux alentours de 2035. En ce sens, le Conseil pour la Recherche Aéronautique Civile (CORAC) a développé une feuille de route pour le développement de nouvelles technologies et pour fédérer les acteurs autour de l'émergence d'un nouvel écosystème de carburants durables [80].

## 2.3. Le secteur de l'aviation et le changement climatique

### 2.3.1. Un secteur à l'origine d'émissions importantes de GES, dont essentiellement du CO<sub>2</sub>

#### 2.3.1.1. Des émissions de GES unitaires (par vol) et sectorielles non négligeables

Le principal Gaz à Effet de Serre (GES) émis par le secteur aérien est le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>). Celui-ci est émis dans l'atmosphère lors de la combustion du kérosène, mais aussi lors de la phase amont, aussi appelée « Well-to-Tank » (du puits au réservoir), et qui regroupe les émissions liées à l'extraction, au raffinage et au transport des carburants. Bien que les émissions liées à cette phase amont soient significatives (équivalentes à environ 17 % des émissions de la combustion), celles-ci ne sont pas toujours incluses dans la comptabilité des émissions carbone du secteur. Lorsqu'elles le sont, les émissions totales ainsi comptabilisées sont qualifiées de « Well-to-Wheel » (du puits à la roue).

Il est estimé qu'un kilogramme de ce carburant entraîne l'émission de 3,75 kg de CO<sub>2</sub> dont 84 % sont des émissions directes liées à la combustion (3,15 kgCO<sub>2</sub>) et 16 % des émissions indirectes (0,6 kgCO<sub>2</sub>) liées à la production du kérosène (extraction, raffinage, transport). La combustion de kérosène entraîne par ailleurs l'émission de protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O) et de méthane (CH<sub>4</sub>). La combustion d'un kilogramme de ce carburant émet 3,825 kg de CO<sub>2</sub>eq quand ces deux autres GES sont pris en compte [15] [84]. La figure ci-dessous (Figure 23) récapitule les différentes valeurs des émissions de CO<sub>2</sub>eq en fonction des périmètres de comptabilité des émissions.

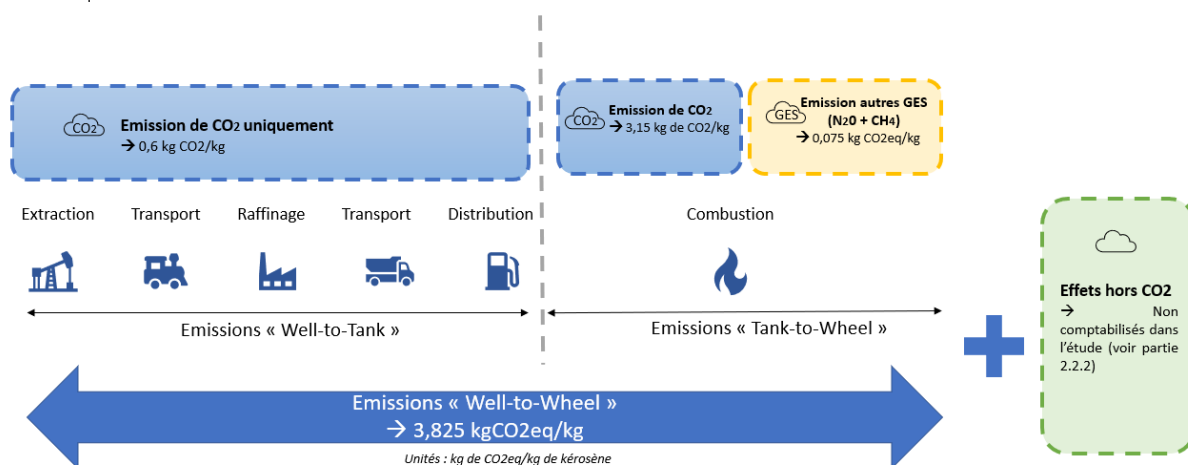


Figure 23 : Détail des émissions de CO<sub>2</sub>eq par kg de kérosène en fonction des périmètres de comptabilité

Par ailleurs, si l'on considère le cycle de vie de l'avion, la très grande partie des émissions sont réalisées lors de la phase d'utilisation des appareils, c'est-à-dire lors de la combustion du carburant qu'ils consomment pour voler (81 % des émissions mondiales de CO<sub>2</sub> de l'aviation). 17 % des émissions

proviennent de la phase de production du carburant et environ 2 % sont réalisées lors du reste du cycle de vie de l'avion (fabrication, fin de vie...) [85].

Il existe un consensus scientifique aujourd'hui sur le fait **que le secteur de l'aérien est directement à l'origine d'entre 2 % et 3 % des émissions mondiales de GES** [86], émissions mondiales qui ont par ailleurs été multipliées par 6,8 entre 1960 et 2018 [26].

Pour la France, les émissions directes liées aux vols domestiques (à l'intérieur de la France, territoires d'outre-mer compris) s'élevaient à environ 5,4 MtCO<sub>2</sub>eq en 2019 et représentaient environ 1,2 % des émissions territoriales françaises (441 MtCO<sub>2</sub>eq hors puits du secteur des terres). Les émissions directes liées aux vols internationaux (entre la France et un autre pays), comptabilisées seulement dans le sens France vers pays étranger (convention qui évite les doubles comptages entre pays et permet de relever simplement les ventes de carburant dans chaque pays, mais ne prend donc en compte que la moitié des vols), s'élevaient quant à elles à environ 18,8 MtCO<sub>2</sub>eq<sup>11</sup>. Les émissions directes totales du secteur aérien s'élevaient donc environ à 24,2 MtCO<sub>2</sub>eq en 2019, ce qui représente **5,3 % des émissions totales de la France** cette même année (hors secteur des terres) [7].

Ces émissions sont quasi-exclusivement liées aux vols commerciaux. En effet, ces dernières s'élevaient à 23,4 MtCO<sub>2</sub>eq en 2019. Les vols commerciaux internationaux représentaient 79 % de ces émissions, et les vols commerciaux entre la France métropolitaine et les Outre-mer et entre les Outre-mer représentaient plus de la moitié (56 %) des émissions directes des vols commerciaux domestiques français à cette date. Par conséquent, les vols commerciaux métropolitains ne représentaient en 2019 que 9 % des émissions des vols commerciaux français<sup>12</sup> [6].

De plus, 90 % des émissions directes liées aux vols commerciaux (internationaux et domestiques) ont lieu pendant la phase de croisière, alors que celles respectivement associées à la phase de LTO (Landing and Take Off – atterrissage et décollage) et à l'utilisation des Moteurs Auxiliaires de Puissance (ou APU pour Auxiliary Power Unit) représentaient pour respectivement 9 % et 1 % de ces émissions en 2019.

Répartition des émissions de CO<sub>2</sub> des vols commerciaux vers et depuis la France en 2019

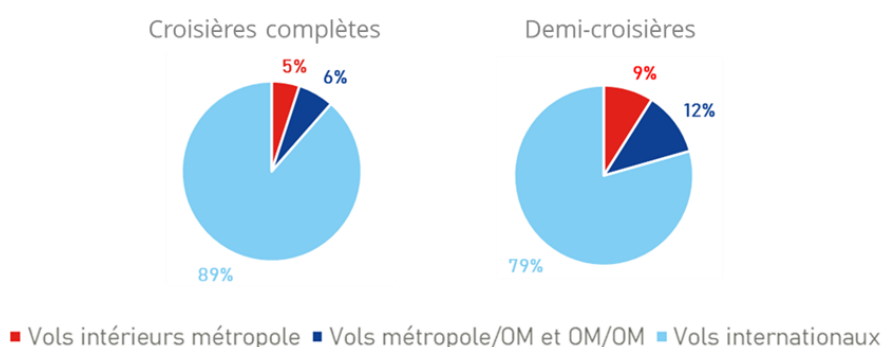


Figure 24 : Répartition des émissions de CO<sub>2</sub> des vols commerciaux vers et depuis la France en 2019<sup>13</sup> [6]

L'aviation non-commerciale (soit les vols hors transport public : vols privés, vols de formations et vols gouvernementaux) ne représentaient par conséquent en 2019 qu'environ 4 % des émissions du secteur aérien français (Figure 12).

<sup>11</sup> Ces émissions sont comptabilisées selon le périmètre « Départs France » (Tableau 1).

<sup>12</sup> Tous les chiffres de ce paragraphe sont calculés selon une convention intitulée « demi-croisière », qui consiste à comptabiliser seulement la moitié des émissions liées aux vols internationaux. Cette convention correspond au périmètre « Départs et arrivées France » présenté dans le Tableau 1.

<sup>13</sup> La convention « croisières complètes » consiste quant à elle à comptabiliser l'intégralité des émissions des vols internationaux.

Tableau 4 : Emissions mondiales du secteur aérien en fonction des périmètres [15]

Émissions du secteur aérien pour l'année 2018 (CO <sub>2</sub> seul)		Contribution de l'aviation aux émissions de CO <sub>2</sub> mondiales 2018 <sup>90</sup>	
		Hors déforestation et changement d'usage des sols	Incluant la déforestation et le changement d'usage des sols
Combustion seule	905 Mt CO <sub>2</sub>	2,5 % de 36,6 Gt CO <sub>2</sub>	2,1 % de 42,1 Gt CO <sub>2</sub>
Combustion + amont	1 077 Mt CO <sub>2</sub>	2,9 % de 36,6 Gt CO <sub>2</sub>	2,6 % de 42,1 Gt CO <sub>2</sub>

### 2.3.1.2. Des vols en croissance mais dont l'intensité carbone diminue

Le trafic aérien augmente fortement au niveau mondial depuis 1970, aussi bien en termes de nombre annuel de passagers et de volume annuel de fret transporté (Figure 4 et Figure 5) qu'en termes de PKTeq (Figure 25) [87].

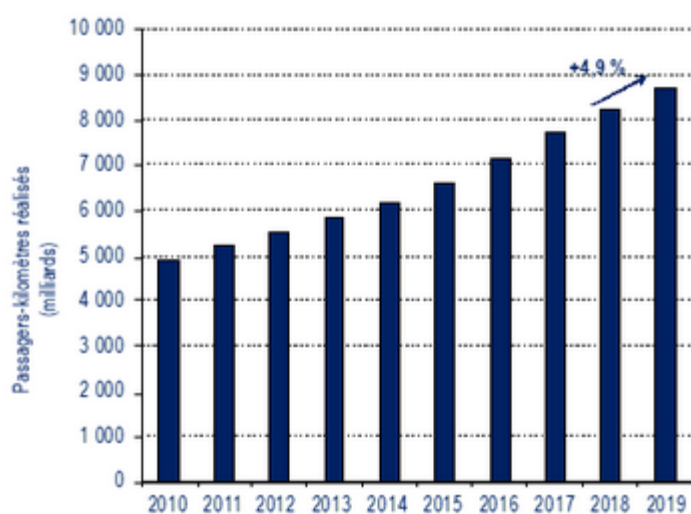


Figure 25 : Passagers-kilomètres réalisés par an dans le monde [87]

La tendance est la même en France, où le nombre de PKTeq a augmenté de 67 % entre 2000 et 2019, avec une augmentation plus marquée pour le trafic international (+79 % sur la même période) que domestique. Durant la même période, les émissions directes de GES du secteur aérien ont augmenté, mais dans une moindre mesure : en 2019, les émissions totales étaient supérieures de 17 % à celles de l'année 2000, avec une distinction entre l'évolution liée aux vols internationaux (+29 %) et celle liée aux vols domestiques (-11 %). Par conséquent, **les émissions unitaires** par passager-équivalent-kilomètre transporté, **ont diminué de 25 % entre 2000 et 2019**. Autrement dit, le transport d'un passager sur un kilomètre est à l'origine de 25 % d'émissions en moins en 2019 qu'en 2000 en moyenne en France [6].

Ce chiffre est cependant contrasté en fonction des types de vols. Ainsi, les progrès réalisés sont plus importants pour les vols internationaux moyen-courriers (-36 % d'émissions unitaires entre 2000 et 2019) que pour les vols intérieurs métropolitains qui sont des vols court-courriers (-29 %) ou que pour les vols long-courriers internationaux (-17 %). Cependant, ces derniers types de vols sont ceux les plus efficaces, devant les vols moyen-courriers (qui sont eux-mêmes plus efficaces que les vols courts-courriers - Tableau 5) [6].

Tableau 5 : Evolution des émissions unitaires des vols commerciaux entre 2000 et 2019 [6]

Emissions unitaires CO <sub>2</sub> (g/PKTeq)	2000	2010	2015	2016	2017	2018	2019	Evolution entre 2000 et 2019
Intérieur métropole	176,3	150,9	131,5	130,0	127,5	125,8	124,7	-29 %
Métropole/OM et OM/OM	88,6	72,4	65,8	66,2	65,5	65,2	63,9	-28 %
International MC	144,6	113,1	101,3	100,8	96,8	93,9	92,5	-36 %
International LC	84,3	70,9	73,9	72,0	69,6	69,2	69,9	-17 %



Total France	103,7	84,4	82,3	81,2	78,7	77,6	77,6	-25 %
--------------	-------	------	------	------	------	------	------	-------

### 2.3.1.3. Un secteur à l'origine d'une part de plus en plus importante des émissions totales françaises

Les émissions totales françaises de GES (hors Utilisation des terres, changement d'affectation des terres et foresterie ou UTCATF) baissent de manière tendancielle depuis 1990, et ont ainsi diminué d'environ 20 % entre 1990 et 2019. Au contraire, les émissions (directes au périmètre « Départs France ») du secteur aérien ont augmenté d'environ 85 % sur la même période. Cette augmentation est principalement liée à l'augmentation des émissions directes liées aux vols internationaux (environ +10 % entre 2016 et 2019 et +105 % entre 1990 et 2019). Les émissions associées aux vols domestiques ont stagné quant à elles avec une légère évolution à la hausse ces dernières années (environ +9 % entre 2016 et 2019 et +37 % entre 1990 et 2019 avec un pic en 2000) (Figure 26). Par conséquent, le rapport entre les émissions du secteur aérien et les émissions françaises augmente de manière tendancielle depuis 1990, passant de 2,4 % en 1990 à 5,3 % en 2019 (Figure 27) [7].

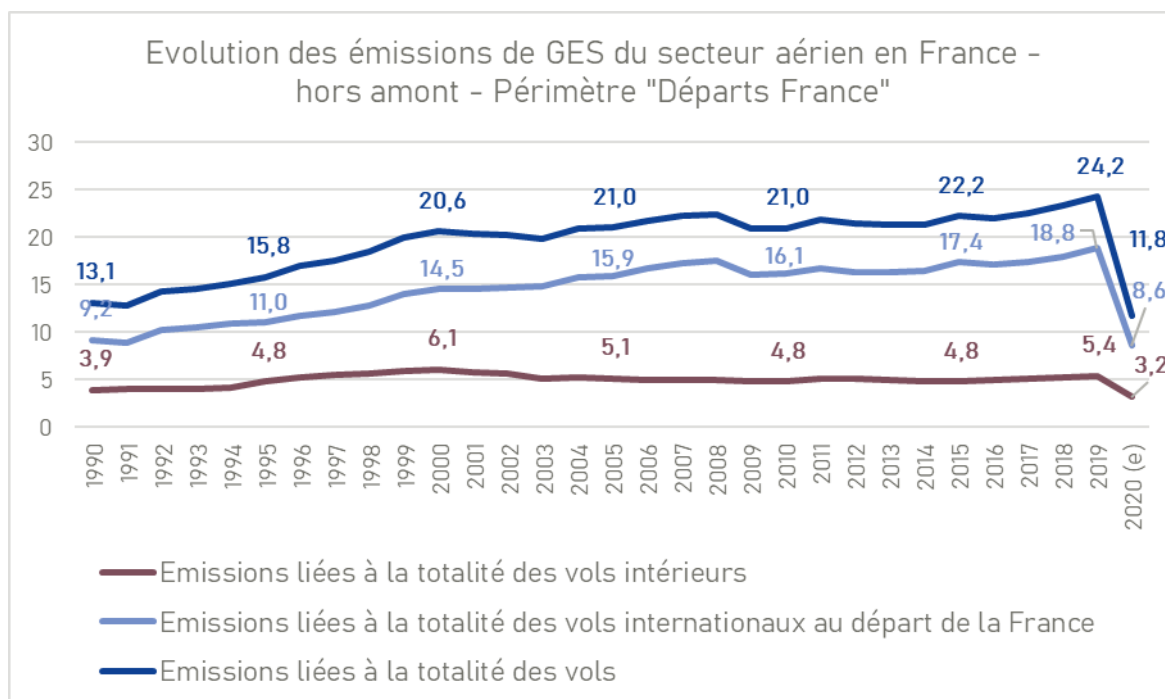


Figure 26 : Evolution des émissions directes de CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O et CH<sub>4</sub> du secteur aérien en France (Périmètre « Départs France ») [7]

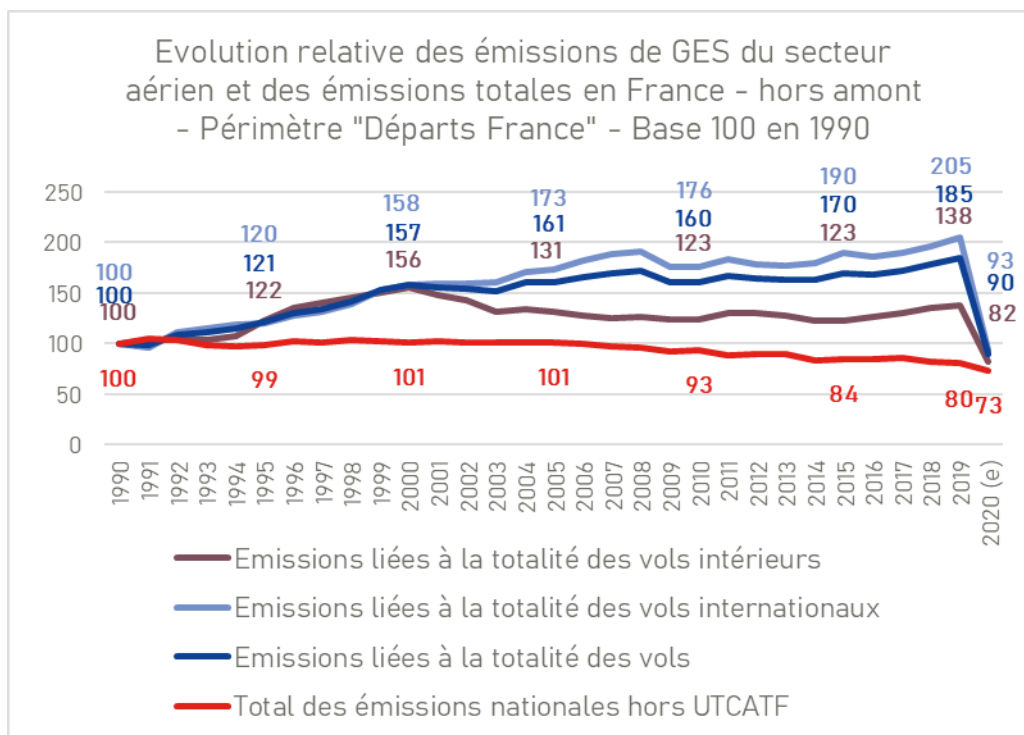
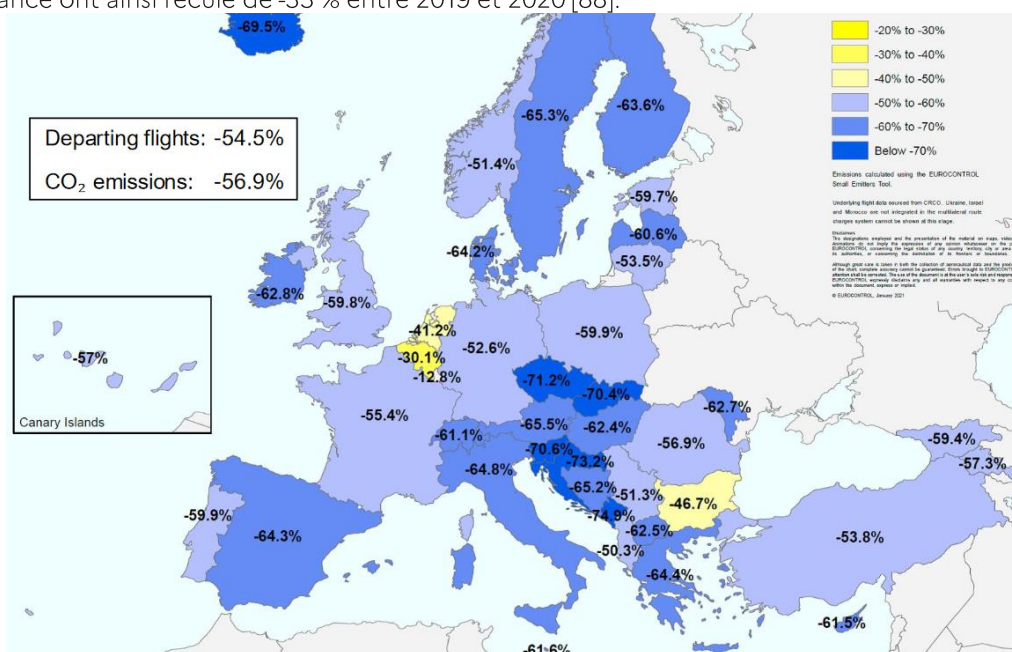


Figure 27 : Evolution relative des émissions directes de GES du secteur aérien et des émissions totales françaises hors UTCATF par rapport à 2019 (Périmètre « Départs France » - Base 100 en 1990) [7]

#### 2.3.1.4. La crise de la Covid a abouti à une baisse historique des émissions de CO<sub>2</sub> du secteur aérien

D'un point de vue environnemental, la COVID-19 a entraîné une baisse historique des émissions de gaz à effet de serre du secteur aérien liée à la baisse du trafic passagers. Les émissions de CO<sub>2</sub> des vols au départ de la France ont ainsi reculé de -55 % entre 2019 et 2020 [88].



### 2.3.1.5. Des émissions qui pourraient continuer à augmenter fortement dans les prochaines années sans changement majeur du secteur

Tous les scénarios prospectifs étudiés dans le cadre de ce rapport (voir par exemple les scénarios évoqués en Partie 4.1) prévoient une hausse de la demande de transport au niveau mondial (en termes de PKTeq, c'est-à-dire autant du point de vue du nombre de vols que des distances parcourues) si aucune mesure de réduction ou de modération de la demande n'est prise.

Comme cela a été évoqué, les émissions de GES du secteur aérien sont aujourd'hui positivement corrélées au niveau de trafic aérien (en PKTeq). A court terme, les solutions organisationnelles ou technologiques disponibles ne permettent pas de changer cela. A moyen et long terme, l'ensemble des leviers techniques de décarbonation du secteur (réduction de l'intensité carbone du mix énergétique, amélioration de l'efficacité énergétique des flottes, amélioration des opérations - voir Partie 3) devront être mobilisés pour permettre la décorrélation des émissions de GES du secteur aérien et le niveau de trafic, afin d'éviter qu'une hausse du trafic ne conduise à une hausse des émissions du secteur.

Par exemple, l'OACI (Organisation de l'Aviation Civile Internationale) estime que si aucune mesure n'était prise, les émissions du transport aérien mondial en 2050 pourraient tripler, voire être multipliées par 4 à 6 par rapport au niveau de 2010, et ce en lien avec une forte croissance du trafic au niveau mondial [26].

Par ailleurs, selon les projections réalisées par l'Agence européenne de la sécurité aérienne (EASA pour *European Union Aviation Safety Agency*) et l'Agence Européenne pour l'Environnement (EEA pour *European Environment Agency*) en 2019 avant la crise sanitaire, les émissions de CO<sub>2</sub> du secteur aérien pourraient croître de 37% en 2040 par rapport à leur niveau de 2017 si le trafic poursuivait sa croissance tendancielle d'avant crise et en l'absence de progrès technologique [89].

En ce qui concerne le cas de la France, se référer à la Partie 4.4.5 pour plus de détails sur la modélisation de l'évolution du trafic dans les scénarios de l'étude.

### 2.3.1.6. Éléments de comparaison de l'évolution des émissions historiques et futures du secteur

A titre d'élément de comparaison, la Figure 29 ci-dessous montre l'évolution, à partir d'une base 100 en 1990 des émissions de GES :

- Du transport aérien français au périmètre « vols domestiques et vols internationaux au départ de la France » ;
- Des transports comptabilisés dans l'inventaire national (n'intègre pas l'international) ;
- De tous secteurs inclus dans l'inventaire national.

Enfin, sur cette figure est représentée l'évolution théorique des émissions nationales qui aurait conduit à réduire les émissions nationales de GES (hors UTCATF) de 85 % en 2050 par rapport à 1990 selon une trajectoire régulière (à taux annuel constant sur la période). Ce niveau est cohérent avec l'objectif inscrit dans la Stratégie Nationale Bas-carbone de réduire les émissions nationales de -83 % en 2050 par rapport à 2015, et ce afin d'atteindre la neutralité carbone en 2050. Cette évolution régulière théorique aurait ainsi conduit les émissions nationales à se situer au niveau -60 % en 2019.

Notons également que le niveau historiquement bas des émissions, atteint en 2020 du fait de la crise sanitaire, représentait une valeur de 82 par rapport à la référence de 100 en 1990 (Partie. 2.3.1.3).

Ces comparaisons sont éclairantes mais doivent être complétées par un élément important : il n'est pas d'usage de considérer que tous les secteurs doivent suivre la même trajectoire relative de baisse de leurs émissions. C'est en particulier le cas de la Stratégie Nationale Bas Carbone, qui prend en compte des potentiels d'atténuation différents selon les secteurs avec une décroissance non systématiquement linéaire. Le détail de l'ambition de la SNBC pour le secteur des transports et de l'aérien est détaillé ci-dessous.

La Stratégie Nationale Bas Carbone en vigueur (SNBC 2) prévoit une réduction de 28 % des émissions du secteur des transports à l'horizon 2030 par rapport à 2015 et une décarbonation quasi-complète du secteur à l'horizon 2050<sup>14</sup>.

En particulier, le scénario de référence sous-jacent à la SNBC 2 en vigueur (le scénario Avec Mesures Supplémentaires 2018 ou AMS 2018) prévoit :

---

<sup>14</sup> Une part de carburants fossiles demeure encore utilisée à l'horizon 2050 pour les transports aériens domestiques et internationaux et les soutes maritimes internationales, ce qui explique que la décarbonation du secteur ne soit que quasi-complète

- Une réduction de -58,7 % des émissions du transport aérien domestique à l'horizon 2050 par rapport à 2015 ;
- Une réduction de -37,1 % des émissions du transport aérien international à l'horizon 2050 par rapport à 2015<sup>15</sup> (Figure 30).

La SNBC 2 prévoit en particulier que le secteur aérien commence à réduire ses émissions en 2030.

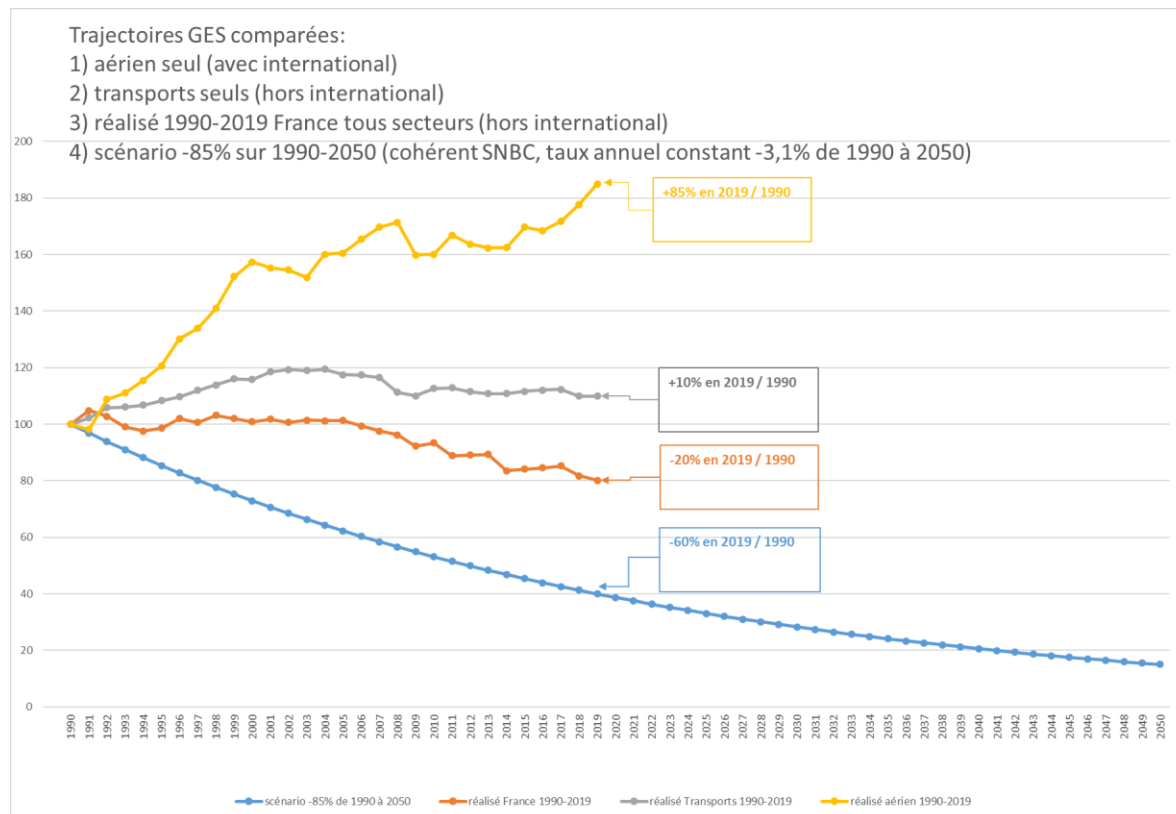
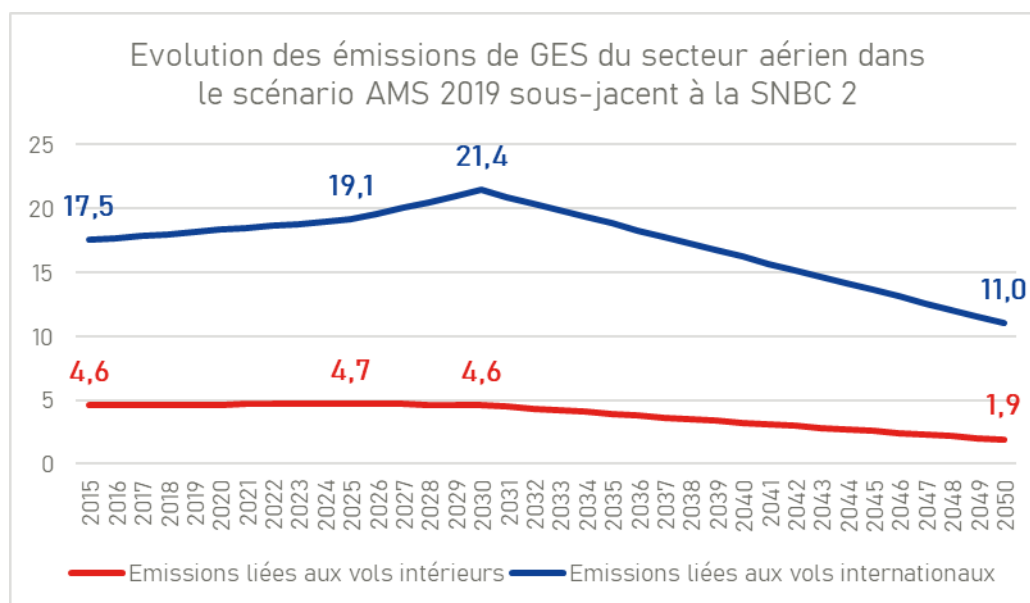


Figure 29 : Evolution des émissions de différents secteurs (aérien, transports et tous secteurs) [90] sur une base 100 en 1990



Pour l'heure, uniquement le transport aérien domestique est couvert par les budgets carbone de la SNBC (le transport aérien international en est actuellement exclu). Néanmoins, la loi sur l'énergie et le climat de 2019 a acté l'ajout d'un budget carbone indicatif intitulé « budget carbone spécifique au transport

<sup>15</sup> A titre de comparaison, les émissions du transport aérien domestique ont augmenté de +12% entre 2015 et 2019 [90]

international» concernant les vols internationaux au départ et à l'arrivée de la France à compter de la troisième édition de la SNBC [8]. Ainsi, la prochaine SNBC, qui devrait être publiée avant juillet 2024 ; comprendra un budget carbone indicatif pour le transport international.

Ces objectifs ne couvrent pas aujourd'hui les émissions de GES liées à l'amont et à l'aval de la chaîne de valeur (production des énergies, productions des avions, des infrastructures, etc.), comptabilisés dans d'autres secteurs de la SNBC.

Par ailleurs, l'objectif européen de réduction des émissions de GES entre 1990 et 2030 a été réhaussé dans la loi européenne sur le climat (entrée en vigueur le 1er juillet 2021). L'Union Européenne a ainsi désormais pour objectif de réduire les émissions territoriales nettes (y.c. le secteur UTCATF) de GES -55 % par rapport à 1990. Ce rehaussement impactera directement les objectifs français à l'horizon 2030. Néanmoins, à la date de rédaction de ce rapport, il n'y a pas encore de déclinaison quantitative du nouvel objectif européen au niveau national.

### 2.3.1.7. Analyse des émissions à l'échelle des individus

En complément, un autre spectre d'analyse est de **considérer les émissions du secteur aérien non plus à l'échelle nationale mais à l'échelle individuelle.**

Afin d'atteindre les objectifs de l'accord de Paris, la SNBC indique, en s'appuyant sur les données du GIEC et en tenant compte de l'évolution de la population mondiale d'ici 2100, que le budget CO<sub>2</sub> compatible serait entre 1,6 et 2,8 t CO<sub>2</sub> par personne et par an sur la période 2018-2100 [9]. Ce calcul permet de proposer une répartition strictement égalitaire de la quantité de CO<sub>2</sub> à émettre entre chaque individu à l'échelle mondiale (Figure 31) [91].

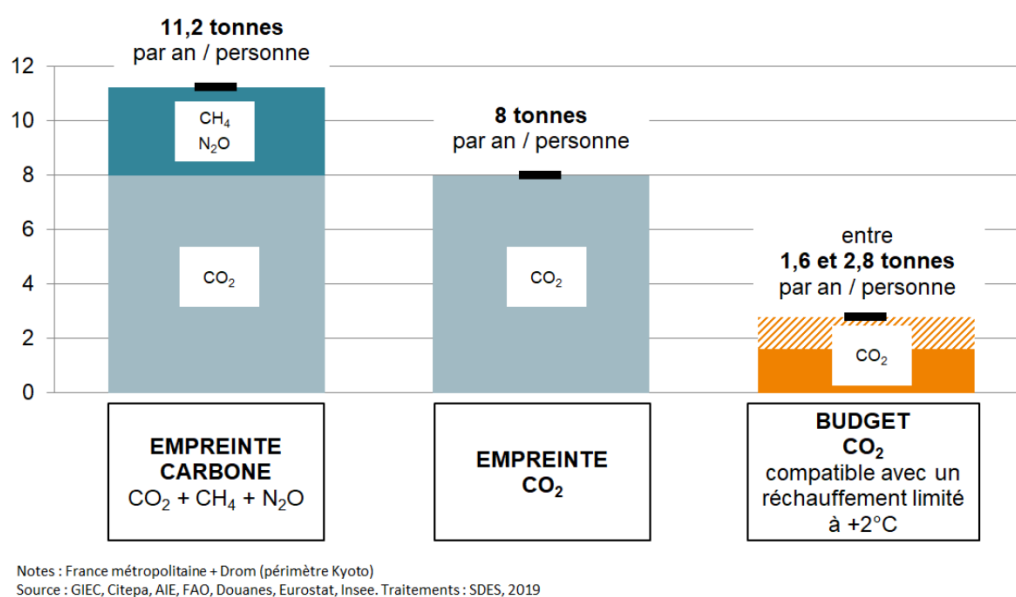


Figure 31 : Comparaison entre l'empreinte carbone des Français en 2018 en t CO<sub>2</sub>eq par an et par habitant et le budget CO<sub>2</sub> compatible avec les accords de Paris et un réchauffement climatique limité à +2°C

Selon d'autres sources, l'empreinte carbone d'un Français moyen s'élevait à 9,9 tCO<sub>2</sub>eq en 2019, dont en moyenne 2650 kg de CO<sub>2</sub>eq pour ses déplacements (soit 27 % de son empreinte carbone du Français moyen). Au sein de ces émissions, la voiture serait le poste le plus important d'émissions (2030 kgCO<sub>2</sub>eq, soit 77 % des émissions individuelles liées aux transports), et ce loin devant l'avion (430 kgCO<sub>2</sub>eq, soit 21 % des émissions transports, et 4 % de l'empreinte carbone moyenne) [92].

Cependant, comme mentionné en partie 2.1.2.1, tous les Français ne prennent pas l'avion. La valeur de 430 kgCO<sub>2</sub>eq par personne est donc une moyenne. Les émissions et/ou la part du transport aérien peuvent donc être beaucoup plus importantes dans l'empreinte carbone d'un individu. En effet, un seul aller-retour Paris/New York émet aujourd'hui environ entre 966 kg et 2,6 tonnes de CO<sub>2</sub>eq par passager selon le calculateur considéré<sup>16</sup>, ce qui dépasse donc largement la moyenne précédente.

<sup>16</sup> 1009 kgCO<sub>2</sub>eq pour l'aéroport Kennedy selon le calculateur DGAC qui ne prend pas en compte les trainées de condensation [93]; 966 kgCO<sub>2</sub>eq en utilisant la base carbone de l'ADEME pour les vols long-courriers sans trainée de condensation; 1762 kgCO<sub>2</sub>eq en utilisant la base carbone de l'ADEME pour les vols longs courriers avec trainées de condensation [94]; 2,6 tCO<sub>2</sub>eq selon [95].



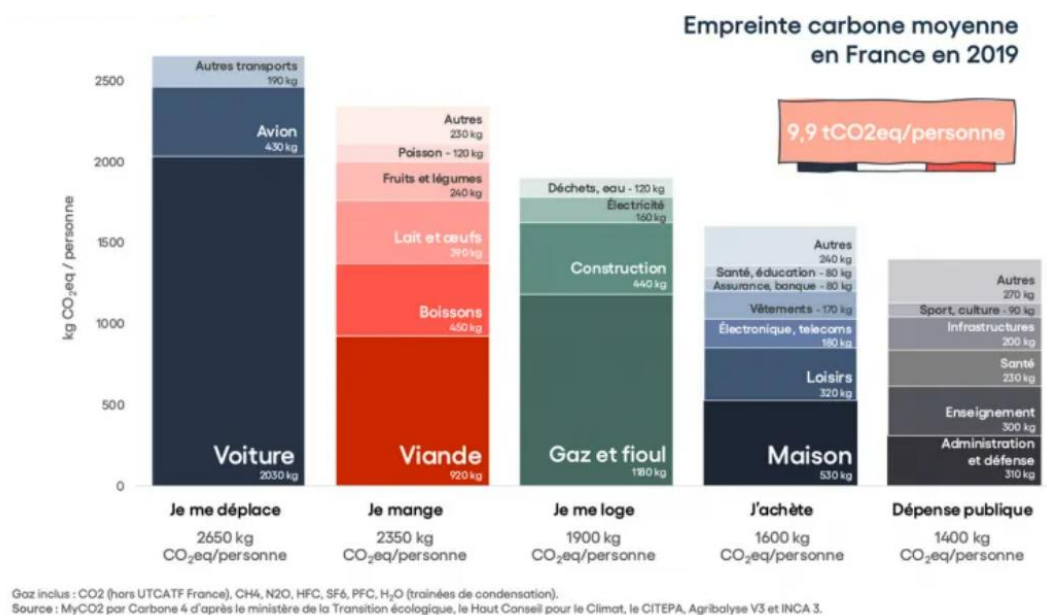


Figure 32 : Empreinte carbone moyenne en France en 2019 [83]

L'empreinte carbone moyenne en France présentée en Figure 32 donc celle d'un « Français moyen », notion qui ne représente aucune population réelle et masque les distinctions entre individus et notamment entre catégories de population selon leur niveau de richesse. La Figure 33 représente la répartition de l'empreinte carbone moyenne selon les catégories de populations dans l'Union Européenne. La part des émissions liées aux déplacements aériens varie de façon conséquente entre les individus jusqu'à une moyenne d'environ 40 % (22,6 tCO<sub>2</sub>eq) pour la catégorie des 1 % les plus riches de l'UE.

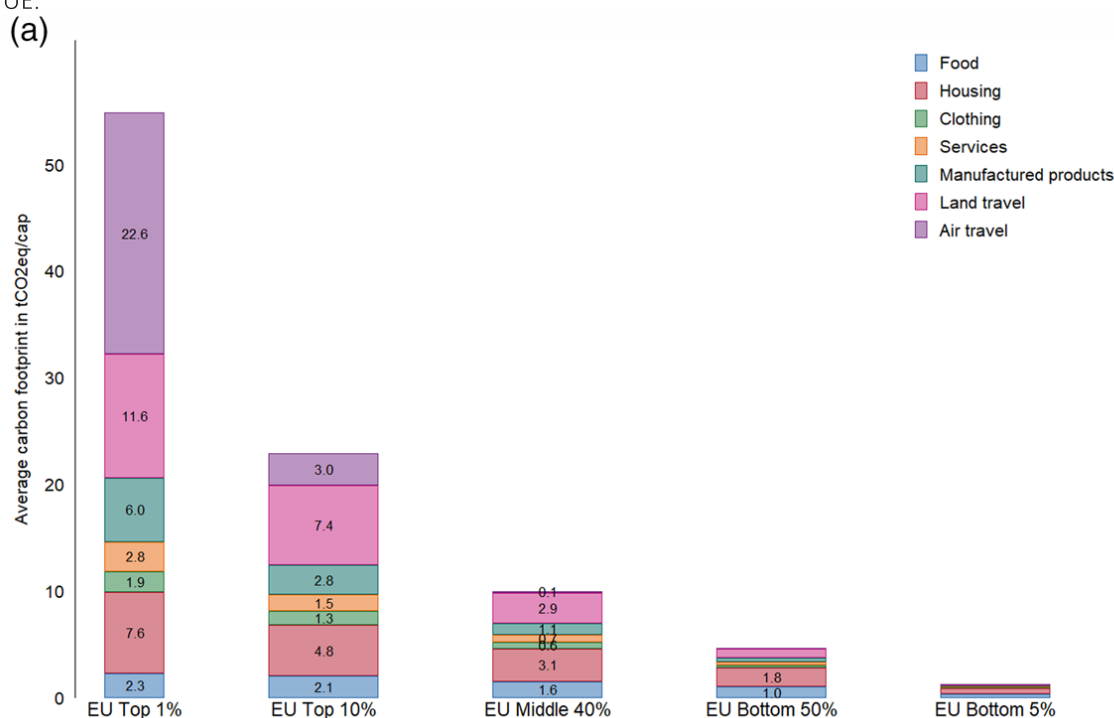


Figure 33 : Répartition de l'empreinte carbone moyenne par catégorie de consommation dans l'Union Européenne[86]

### 2.3.2. D'autres effets « hors CO<sub>2</sub> » qui augmentent encore la contribution du secteur aérien au changement climatique

En parallèle des effets induits par les émissions de CO<sub>2</sub>, d'autres effets de l'aviation influent sur la physique du climat. Ces effets sont communément appelés effets « hors CO<sub>2</sub> ». Leur impact climatique est mesuré grâce à l'indicateur intitulé « forçage radiatif ». Selon le glossaire de l'AR5 du GIEC [96], le forçage radiatif



représente la variation du rayonnement net à la tropopause<sup>17</sup> ou au sommet de l'atmosphère, c'est-à-dire la différence entre le flux radiatif reçu et celui émis par le système terre due à une modification d'un agent externe du changement climatique, par exemple une modification de la concentration de dioxyde de carbone ou du rayonnement solaire. Il s'agit du changement par rapport à l'année 1750 et se rapporte à une valeur moyenne annuelle à l'échelle du globe.

Le forçage radiatif (ou encore RF pour « *radiative forcing* ») est dit instantané lorsque les changements rapides de température dans la stratosphère ne sont pas pris en compte. Lorsque ces ajustements rapides sont comptabilisés (notamment via les modifications rapides de la couche inférieure, la troposphère, en tenant compte des mouvements convectifs, des précipitations, des nuages...), l'indicateur utilisé est celui de « forçage radiatif effectif » (ou ERF pour « *Effectif Radiative Forcing* »).

L'indicateur ERF est privilégié pour saisir la vitesse et la valeur du réchauffement climatique. Il permet donc de comparer l'impact d'agents qui n'ont pas les mêmes valeurs de persistance dans l'atmosphère ou n'impliquent pas la même rapidité de réponse de forçage.

Cette nuance est importante à saisir afin de comprendre l'impact des effets « hors CO<sub>2</sub> » sur climat. En effet, ces derniers présentent des caractéristiques différentes selon que l'indicateur utilisé est l'ERF ou le RF, notamment sur les impacts des aérosols [97].

Dans la suite de cette partie sont exposés les détails des différents effets « hors CO<sub>2</sub> » de l'aviation. Il est important de noter que ces connaissances sur les sujets des effets « hors CO<sub>2</sub> » présentent encore une marge d'incertitude importante mais doivent être considérées au vu des ordres de grandeur correspondants. Par ailleurs, ces résultats concernent uniquement les émissions liées au carburant actuellement utilisé, à savoir le kérosène. Ils ne sont donc pas pertinents pour les émissions liées à la combustion de carburants alternatifs comme les biocarburants ou l'hydrogène.

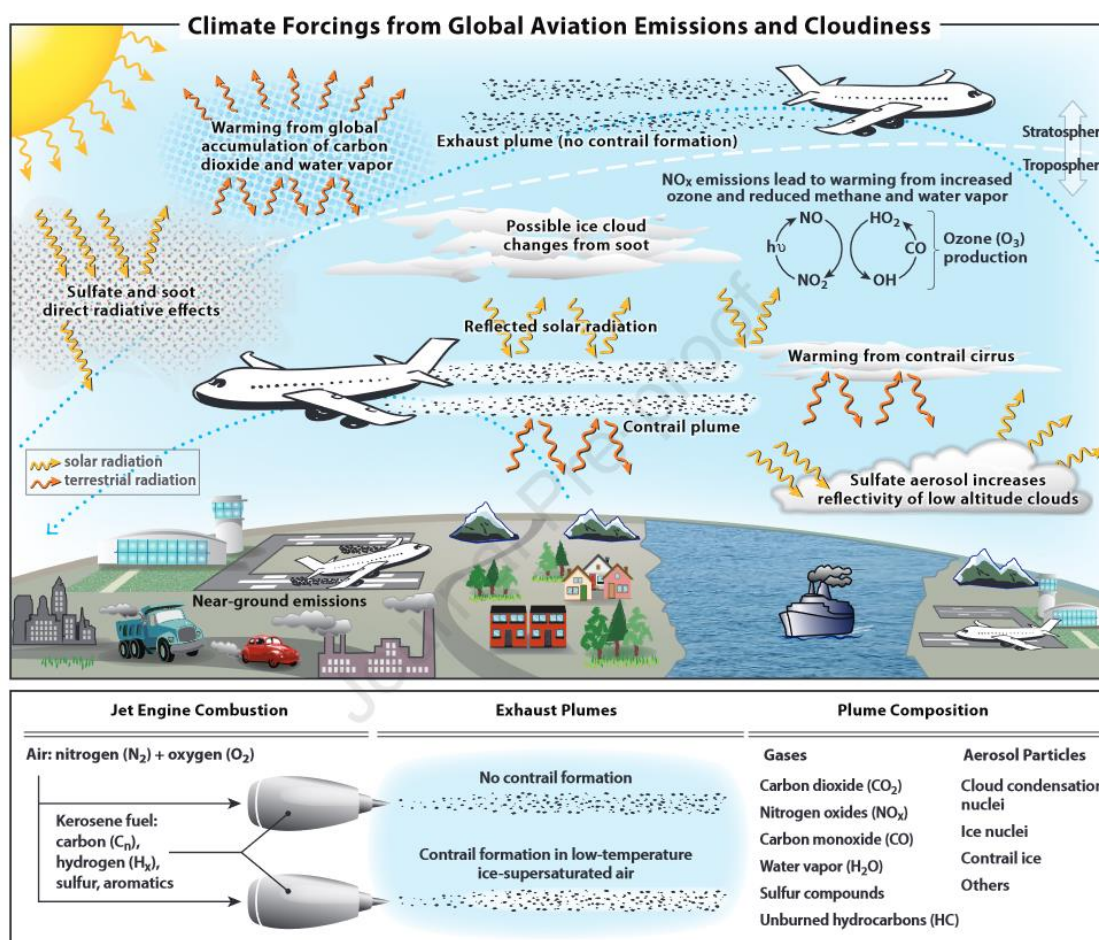


Figure 34 : Illustration des différents impacts "hors CO<sub>2</sub> " de l'aviation sur le climat [26]

<sup>17</sup> Limite entre la troposphère et la stratosphère

### 2.3.2.1. Les oxydes d'azote - NO<sub>x</sub>

Deux types de NO<sub>x</sub> sont produits dans les réacteurs des avions par oxydation de l'azote de l'air aux fortes valeurs de température et de pression en sortie de chambre de combustion du moteur : il s'agit des NO (Monoxyde d'azote) et NO<sub>2</sub> (Dioxyde d'azote).

Les effets sur le climat des NO<sub>x</sub> ont lieu en deux temps :

- Rapidement après la génération de NO<sub>x</sub>, une réaction chimique entraîne la formation d'ozone troposphérique (O<sub>3</sub>), qui est un gaz réchauffant ;
- A plus long terme, les NO<sub>x</sub> réagissent avec le méthane (CH<sub>4</sub>) ambiant, ce qui induit une baisse du forçage radiatif associé. Par ailleurs la réduction du méthane induit aussi une baisse de la vapeur d'eau stratosphérique et de l'ozone troposphérique. Cela produit donc un effet refroidissant[98].

L'effet net permet de cumuler ces deux effets et d'estimer l'impact global des NO<sub>x</sub> de l'aviation. L'effet net est aujourd'hui réchauffant du fait de la prépondérance de l'effet de réchauffement dû à l'ozone troposphérique [99]. Néanmoins des incertitudes existent quant à l'évolution de cet effet net qui pourrait varier à l'avenir selon l'évolution de la composition atmosphérique [89].

### 2.3.2.2. Les aérosols

Les aérosols produits par l'aviation sont de différentes compositions : il s'agit de suies carbonées, de composés sulfatés et de nitrate.

Les aérosols ont deux types d'interactions sur l'ERF :

- Des interactions radiatives dites « directes » qui traduisent les interactions entre les aérosols et les rayonnements solaires. Les types d'aérosols produits par l'aviation ont des effets directs inverses : les aérosols composés de suies absorbent les rayonnements solaires à courtes longueurs d'ondes, ce qui induit un effet réchauffant ; alors que les aérosols constitués de composés sulfatés ont principalement un effet de dispersion du rayonnement solaire entrant, ce qui induit un refroidissement. La quantification de ces effets est difficile car la dynamique temporelle est rapide et différente de celle des autres GES.
- Des interactions dites « indirectes » entre les aérosols et la formation de nuages. En effet la présence d'aérosols constitue des noyaux de condensation favorisant la formation de nuages pour des plus faibles taux d'humidité (appelé effet Kelvin [100]). L'ajout d'aérosols dans l'atmosphère induit une augmentation immédiate de la quantité de nuages. Néanmoins, la connaissance scientifique est insuffisante sur ce sujet pour quantifier les impacts de ces interactions sur l'ERF.

Par conséquent, l'impact des émissions d'aérosols liées à la combustion de kérosène en termes d'ERF est aujourd'hui inconnu [99].

### 2.3.2.3. La vapeur d'eau émise à haute altitude

L'émission de vapeur d'eau dans les altitudes de vol (basse stratosphère) induit un effet réchauffant. Il est néanmoins difficile d'estimer précisément ce réchauffement au vu des nombreux paramètres concernés (changements saisonniers des hauteurs des couches atmosphériques, temps de résidence courts dans l'atmosphère...) [99]. Son impact est plus faible que les autres émissions du transport aérien.

### 2.3.2.4. Les contrails ou traînées de condensation

Les traînées de condensation sont des panaches blancs qui se forment à haute altitude entre 8 et 13 km à la sortie des réacteurs si l'air est suffisamment froid et humide pour provoquer la condensation de la vapeur d'eau émise par les moteurs, autour de noyaux de condensation présents dans les suies et les gaz de combustion et dans l'atmosphère.

Le terme « traînées de condensation » (nommées « contrails » en anglais) est le terme générique regroupant tous les panaches blancs visibles après le passage d'avions en haute atmosphère. Lorsque ces nuages persistent plus de 10 minutes, on utilise le terme « nuages induits par les avions » (ou Aircraft-induced Clouds » en anglais). Ces nuages induits se subdivisent eux-mêmes en deux catégories : les traînées de condensation persistantes (si elles maintiennent une forme linéaire) et les cirrus de traînées (si elles ne maintiennent pas leur forme linéaire)[101]. Le Tableau 6 ci-dessous détaille les caractéristiques de chacune de ces catégories de nuages induits.

Tableau 6 : Caractéristiques des traînées de condensation [102]

Nuages induits par les avions	Courte durée	Longue durée	
Type	Traînées de condensation ( <i>Contrail</i> )	Traînées persistantes ( <i>Persistent contrail</i> )	Cirrus de traînée ( <i>Contrail cirrus</i> )
Morphologie	Linéaire	Linéaire	Non linéaire
Durée	0,1-10 min	10 min-10h	
Epaisseur	100 m	100-1000 m	
Largeur	10-100m	0,1-10 km	<100 km
Longueur	0,1-10 km	0,1-10 km	<100 km

Les effets climatiques des traînées de condensation dépendent de plusieurs paramètres comme la localisation et l'altitude, puisque leur durée de vie est variable selon les conditions météorologiques. Elles peuvent ainsi s'estomper quelques secondes seulement après leur formation, par sublimation de la glace, mais également persister et s'étendre alors pour former des nuages induits du type cirrus.

Les cirrus induits ont un effet refroidissant lors de ses interactions avec les longueurs d'ondes courtes (rayonnement solaire) et un effet réchauffant pour les grandes longueurs d'onde. De nuit, ces cirrus ont uniquement un effet réchauffant [99].

Selon certaines études récentes, la contribution au réchauffement climatique des traînées de condensation serait plus grande que celle des émissions de CO<sub>2</sub> du secteur aérien [103]. Il n'existe cependant aujourd'hui pas de consensus scientifique sur la manière de quantifier et de comptabiliser cette contribution.

A titre d'exemple, l'ADEME retient, à titre conservatoire, une valeur pour la contribution des traînées de condensation égale à celle des émissions de CO<sub>2</sub> liées à la combustion du kérosène, ce qui conduit à doubler l'impact climatique du secteur aérien, hors émissions amont de fabrication du carburant [94].

Le Tableau 7 donne des estimations issues de la littérature de la contribution des nuages induits dans le forçage radiatif de l'aviation pour différentes années [101].

Tableau 7 : Estimation du forçage radiatif (RF) de l'aviation issu des révisions bibliographiques : valeurs globales et annuelles en mW.m-2[101]

Année	RF (mW.m <sup>-2</sup> )				Source :
	Nuages induits		CO <sub>2</sub>	TOTAL	
	Trainées persistantes*	Cirrus de traînée			
1992	20	NE	18	48,5	GIEC (1999) [51]
2000	10	NE	25,3	47,8	SAUSEN et al. (2005) [47]
2005	11,8 <sup>a</sup>	NE	28,0	78	LEE et al. (2009) [45]
	33,0 <sup>b</sup>				
2005	67,5 <sup>c</sup>		25,0	95,2	LEE et al. (2020) [6]
2006	63,0 <sup>d</sup>		NE	NE	SCHUMANN et al. (2015) [22]
2006	12 <sup>e</sup>		NE	NE	CHEN & GETTELMAN (2013) [26]
2006	49,0		24,0	NE	BOCK & BURKHARDT (2019) [10]
2011	85,6 <sup>c</sup>		29,0	117,4	LEE et al. (2020) [6]
2015	32,6 <sup>f</sup>		NE	NE	SANZ-MORERE et al. (2020) [5]
2018	111,4 <sup>c</sup>		34,3	149,1	LEE et al. (2020) [6]

NE : Valeur non estimé.

<sup>a</sup> LEE et al. (2009) [45] utilisent la terminologie « contrails » pour désigner les « traînées persistantes ».

<sup>b</sup> LEE et al. (2009) [45] utilisent la terminologie « AIC ».

<sup>c</sup> LEE et al. (2020) [6] et BOCK & BURKHARDT (2019) [10] utilisent la terminologie « contrail cirrus » pour désigner les « nuages induits ».

<sup>d</sup> SCHUMANN et al. (2015) [22] utilisent la terminologie « contrails » pour désigner les traînées de condensation de durée de quelques minutes à 36 h. Dans ce document c'est défini comme « traînées de condensation », le terme le plus vaste.

<sup>e</sup> CHEN & GETTELMAN (2013) [26] utilisent la terminologie « contrails » et « contrail cirrus » pour désigner les « nuages induits ».

<sup>f</sup> SANZ-MORERE et al. (2020) [5] utilisent la terminologie « contrails » pour désigner les « nuages induits ».

### 2.3.2.5. Conclusion

La Figure 35 ci-dessous illustre la comptabilité des impacts de l'aviation sur le forçage radiatif effectif selon l'état actuel des connaissances scientifiques.

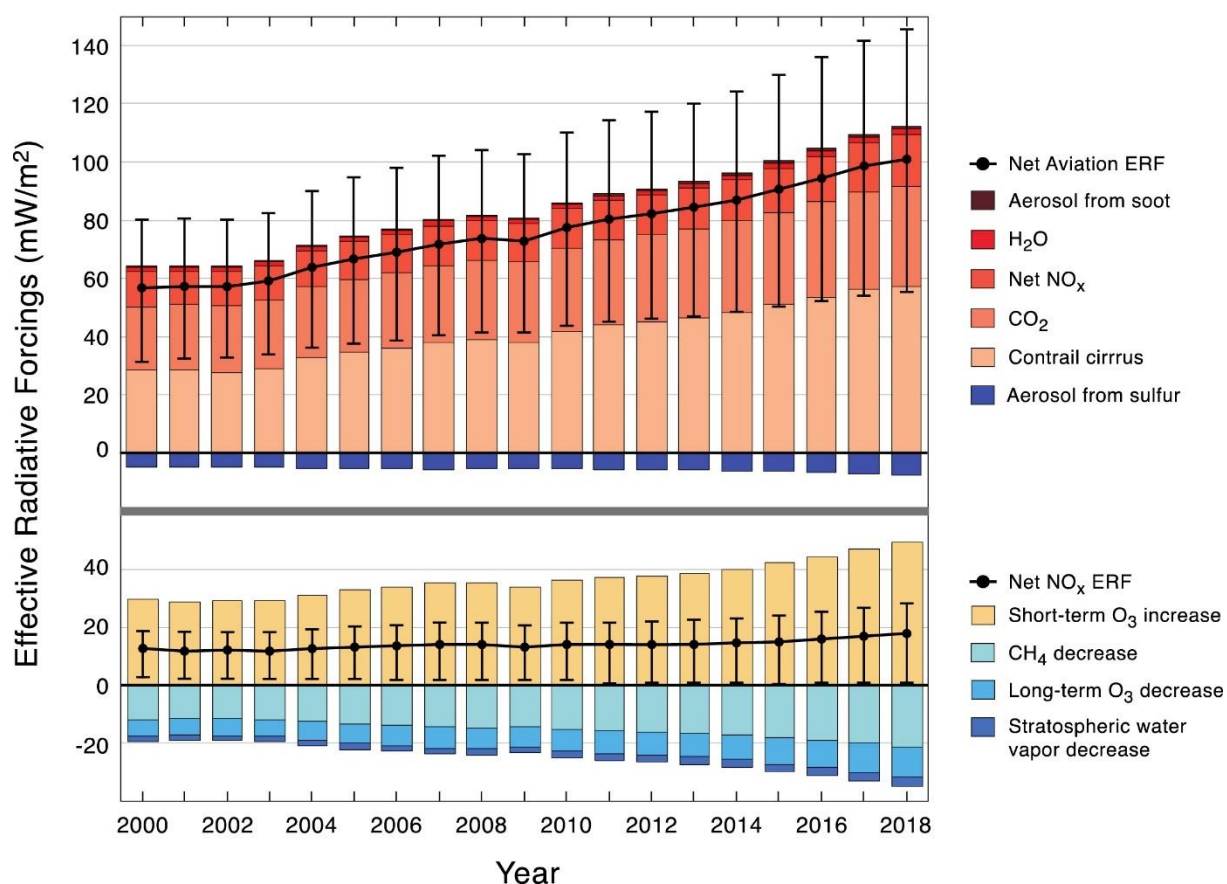


Figure 35 : Forçage radiatif effectif global de l'aviation entre 2000 et 2018 [99]

En conclusion, les effets « hors CO<sub>2</sub> » de l'aviation sont multiples et restent très incertains au vu des connaissances scientifiques sur le sujet. Néanmoins il s'agit de noter que les émissions de CO<sub>2</sub> pourraient ne constituer finalement quasiment qu'un tiers de la contribution de l'aviation au dérèglement climatique, alors que les traînées de condensation seraient les effets « hors CO<sub>2</sub> » avec l'impact le plus fort sur le dérèglement climatique (puisque qu'elles pourraient conduire à un doublement des impacts de l'aviation sur le climat). Pour l'année 2018, les émissions en équivalent CO<sub>2</sub> de l'aviation (incluant le CO<sub>2</sub>, les effets hors CO<sub>2</sub> mais en excluant les émissions de la partie amont) auraient représenté environ 1,7 fois la contribution du CO<sub>2</sub> de combustion seul. Le transport aérien aurait contribué à 3,5 % [3,4 % – 4,0 %] du forçage radiatif effectif anthropogénique pour l'année 2011 [15].

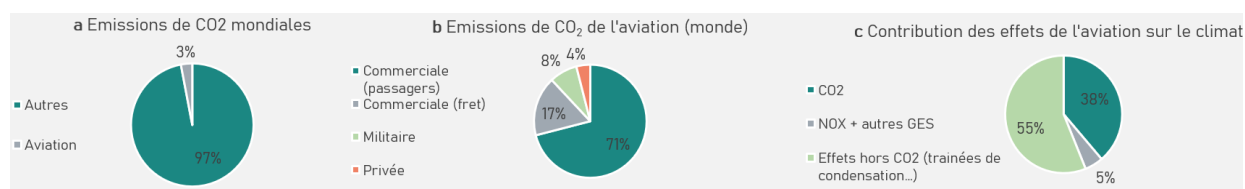


Figure 36 : Parts relatives des effets de l'aviation sur le forçage radiatif en 2018

- Participation de l'aviation au forçage radiatif global en 2018[104]
- Part des différents usages de l'aviation dans les émissions mondiales du secteur (Calculation based on Eyers et al., 2004, IATA, 2019, ICCT, 2019, IEA, 2019)
- Part de la contribution au forçage radiatif des différents effets de l'aviation (les nuages induits par l'aviation (Aircraft-Induced Clouds - AIC) contribuent à plus de la moitié). [102]



## 2.4. Une part du trafic en compétition avec d'autres secteurs du transport

### 2.4.1. La place de l'aérien vis-à-vis des autres transports de voyageurs

Afin de comprendre l'importance du secteur aérien par rapport aux différents moyens de transport, il est possible de regarder différents critères. Le secteur aérien représentait 0,1 % des trajets, 1 % du temps de transport et 16% des kilomètres parcourus en 2017 en France.

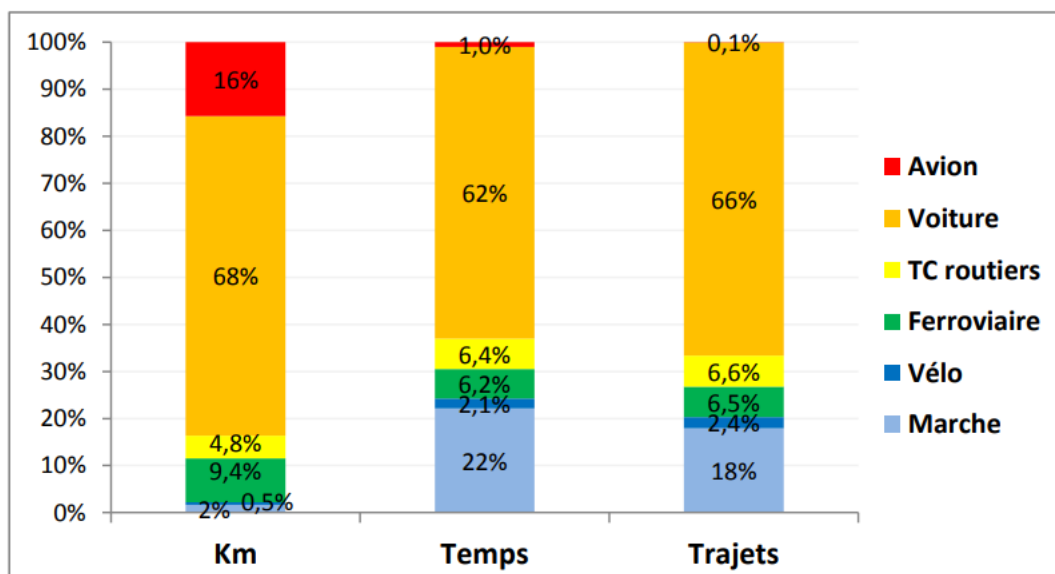


Figure 37 : Part des différents modes de transport de voyageurs en 2017 en France, selon le nombre de kilomètres parcourus, le temps de trajet et le nombre de trajets (incluant les déplacements à l'étranger) [105]

En ce qui concerne les émissions de gaz à effet de serre, le secteur des transports (marchandises et voyageurs) représente 31% des émissions de la France (hors soutes internationales) avec 136 MtCO<sub>2</sub>eq en 2019 (total national hors transports aérien et maritime internationaux). Les émissions sont restées stables entre 2018 et 2019 après avoir légèrement baissé entre 2015 et 2018 (-1,5 %)

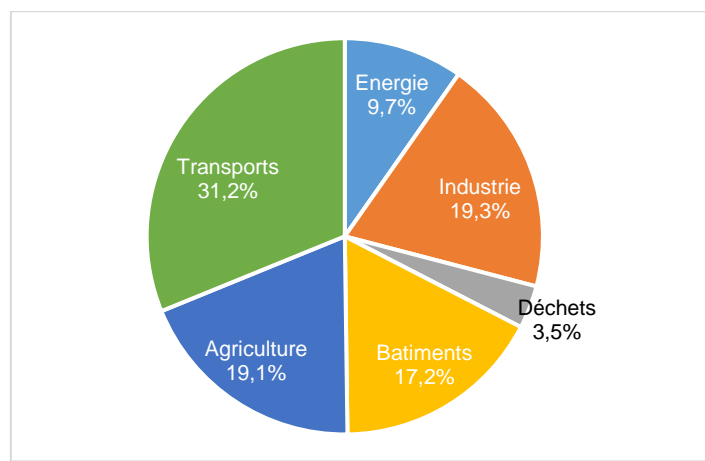


Figure 38 : Répartition sectorielle des émissions nationales de GES en 2019 [90]

Le transport routier représente 94 % des émissions nationales de ce secteur. Le transport aérien domestique (qui comprend notamment les liaisons entre la métropole et l'Outre-mer) représente 63 % des émissions liées aux modes de transports non routiers, soit 4 % des émissions totales du secteur des transports.

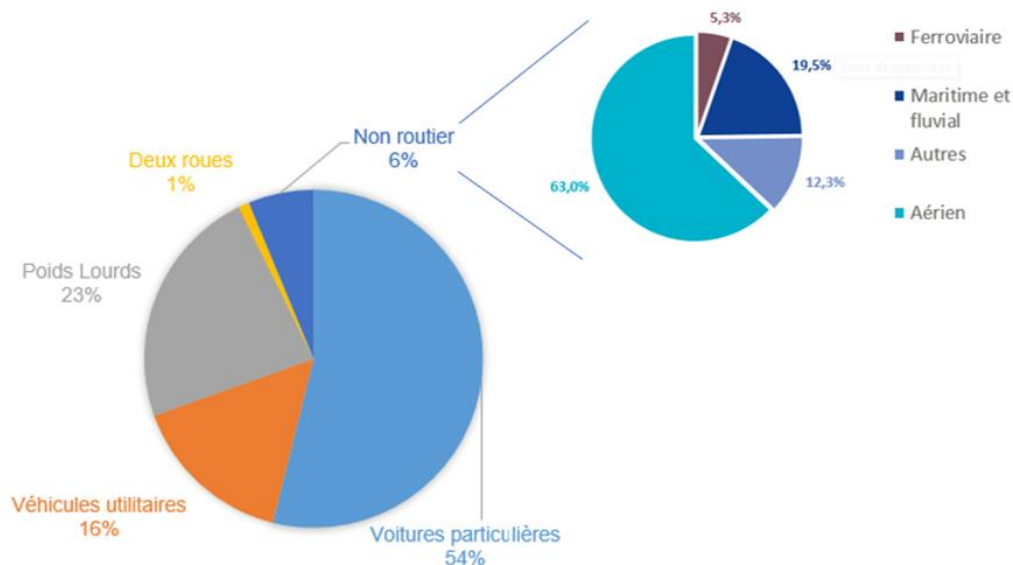


Figure 39 : Répartition des émissions nationales de GES du secteur des transports en 2019 [90]

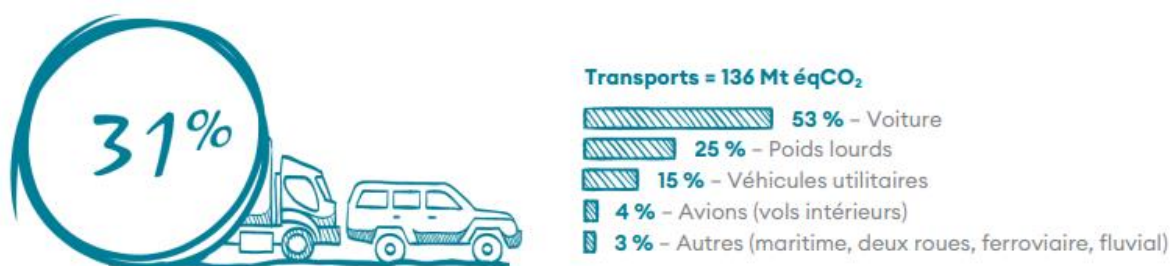


Figure 40 : part des émissions du secteur des transports en France (hors international) [106]

Par ailleurs, comme l'illustre la Figure 41, la part des émissions du secteur aérien (national et international) dans les émissions du secteur des transports (total national complété par les transports maritime et aérien internationaux) est en nette augmentation, évoluant de 9,3 % en 1990 à 15,1 % en 2019 [7].

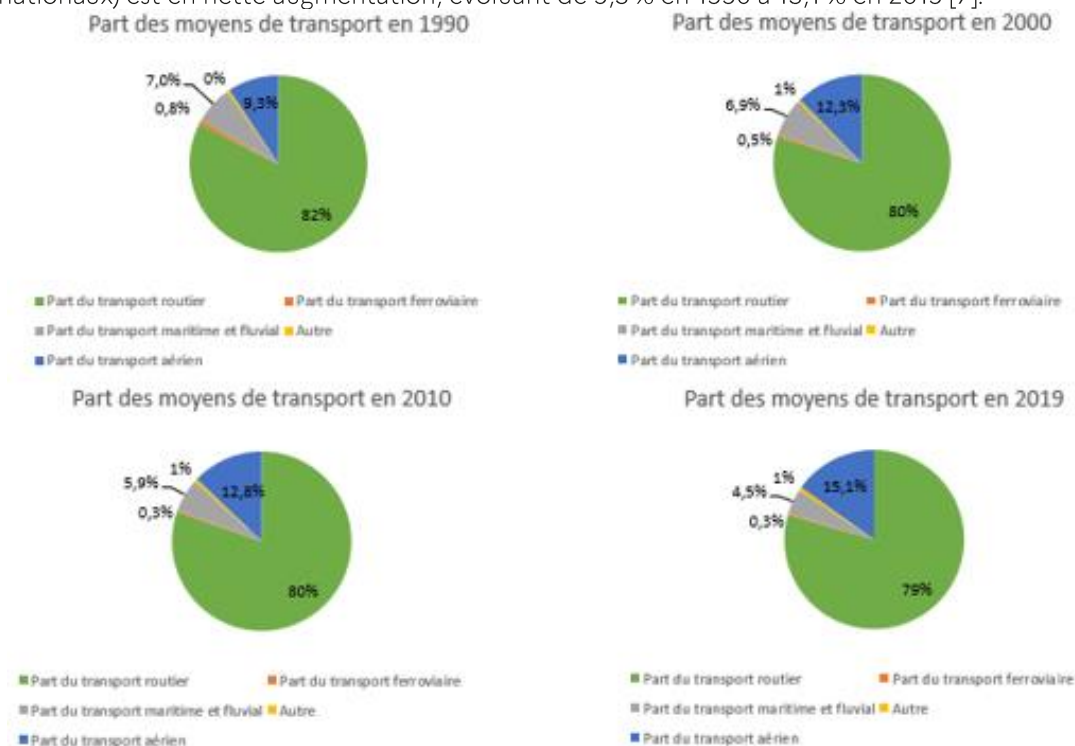


Figure 41 : Part des émissions des différents moyens de transport dans les émissions du secteur du transport (national + maritime et aérien international) pour différentes années [7]



## 2.4.2. Compétition du point de vue climatique

### Des émissions unitaires de GES (par passager-kilomètre) parmi les plus élevées de tous les modes de transport

L'avion est, avec la voiture, la solution de transport de personne la plus émettrice de GES en France, en moyenne.

Il s'agit tout de même de porter une attention particulière aux données proposées dans les comparateurs, ainsi qu'aux périmètres d'étude. En effet, comme le montrent les éléments ci-dessous, certaines hypothèses peuvent faire varier significativement les résultats.

Par exemple, bien que les tendances soient similaires, les résultats des Figure 42 et Figure 43 ne sont pas identiques : les émissions sont plus élevées pour une voiture de taille importante que pour l'avion dans l'étude de l'ATAG alors que la distinction est moins évidente en exploitant les données de la Base Carbone de l'ADEME. Les variations sont liées aux hypothèses retenues sur un certain nombre de paramètres :

- Le taux d'occupation moyen des modes de transport (avec une moyenne d'occupation de 1,6 pour les voitures en France : 1,4 pour les courtes distances et 2,2 pour les longues distances) ;
- Le type de véhicule (petite voiture ou SUV) et leur proportion dans les flottes globales ;
- Le type de vol considéré (court / moyen / long-courrier, ou moyenne des trois) ;
- Les sources d'énergie utilisée (véhicules électriques et diesel) ;
- Les émissions considérées (inclusion ou non de la production et distribution du carburant, des effets hors CO<sub>2</sub> telles que les traînées de condensation pour l'aviation).

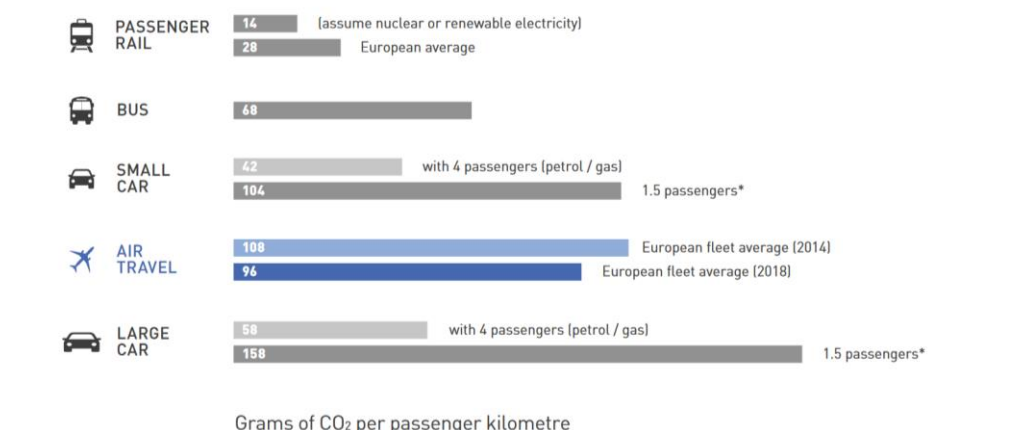


Figure 42 : Comparaison source ATAG des émissions de CO<sub>2</sub> des différents modes de transport (2014)[12]

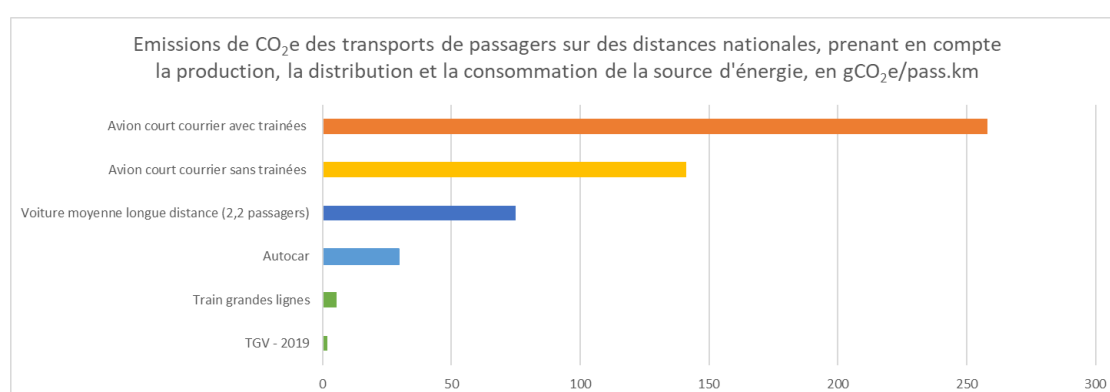


Figure 43 : Comparaison source ADEME des émissions de GES des différents modes de transport sur des distances nationales[107]

Le train reste en France le mode de transport le plus décarboné du fait du faible contenu carbone moyen de l'électricité française (en dehors des très courtes distances, pour lesquelles les modes actifs comme le vélo ou la marche sont encore meilleurs). Ce mode de transport reste toujours moins émissif en CO<sub>2</sub> que l'avion lorsque les émissions liées à la construction des trains sont prises en compte (environ 0,63 gCO<sub>2</sub>e par voyageur et par kilomètre)<sup>18</sup> [107] [109]. A noter que les émissions liées à la maintenance et la fin de

<sup>18</sup> Un point d'attention est tout de même à porter sur le type de train utilisé puisque deux types différents de trains n'émettent pas en moyenne la même quantité d'émissions. En effet alors qu'un Train Grande Vitesse émet

vie des trains, ainsi que celles liées aux infrastructures ne sont pas encore incluses dans la Base Carbone bien qu'elles sont considérées comme un impact important dans le cas du transport ferroviaire en particulier [110]

Néanmoins les émissions unitaires (par passager-kilomètre) ne sont pas le seul indicateur pertinent pour comparer les émissions des différents modes de transport. En effet, l'avion a un impact climatique plus important que les autres modes de transport puisqu'il est utilisé pour parcourir des distances plus grandes.

Ce phénomène est lié au fait que les individus lorsqu'ils voyagent choisissent leurs destinations en fonction du mode de transport qu'ils utilisent, en raisonnant à temps de transport constant. Un voyage en avion sera donc associé à une distance plus grande qu'un voyage en voiture, et donc à un impact climatique plus important, bien que ces deux modes de transports puissent être équivalents en termes d'intensité d'émissions sous certaines conditions (Partie 2.4.1). La vitesse de l'avion induit ainsi que les trajets moyens effectués en avion sont d'une distance de 2400km, contre des trajets longues distances à partir de 200km pour les autres modes de transport<sup>19</sup>. L'augmentation de la distance parcourue par ce mode de transport induit par conséquent un impact climatique bien plus élevé de l'aviation, à émission kilométrique équivalente.

Pour rendre compte de ce phénomène, Aurélien Bigo compare dans sa thèse sur les Transports face au défi climatique les émissions des différents modes de transport en termes d'émission de CO<sub>2</sub> par heure de transport et par trajet et non par km parcouru [105]. La Figure 44 permet de visualiser l'impact climatique bien plus élevé par trajet effectué en avion par rapport aux autres modes de transport sur les longues distances (qui correspondent aux trajets concurrents de l'avion) [112].

Cette comparaison permet de mettre en avant l'impact du choix du mode de transport pour un même usage (par exemple « partir en vacances ») ; qui a un impact climatique différent en fonction de la vitesse et donc des distances parcourues moyennes.

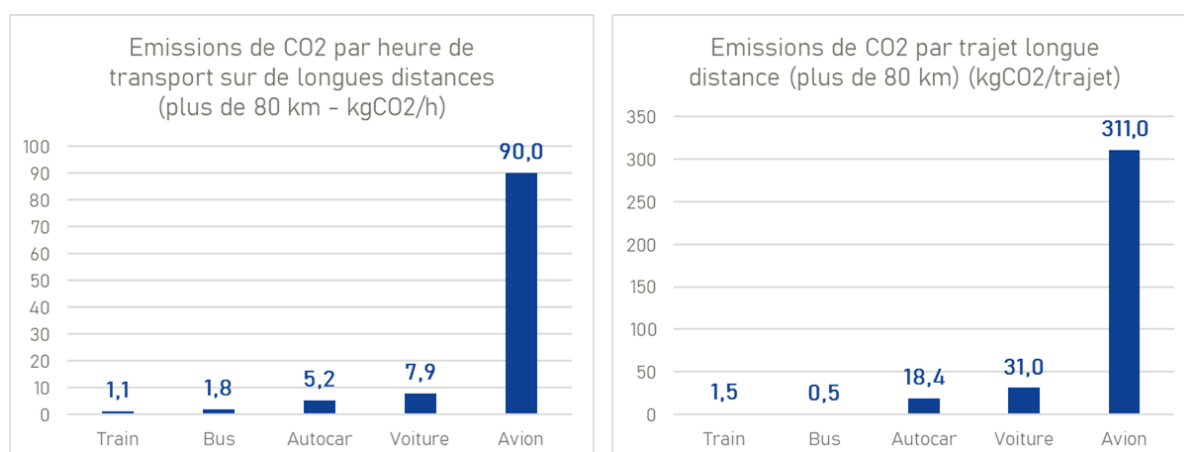


Figure 44 : Emissions de CO<sub>2</sub> par heure de transport puis par trajet, en fonction du mode de transport, d'après [112]

### **Une prise en compte des enjeux climatiques liés au transport aérien de plus en plus présente dans les choix des voyageurs, notamment avec le phénomène *Flygskam***

Le *Flygskam* est un mot suédois qui désigne la honte de prendre l'avion et qui est né du paradoxe entre l'engagement environnemental d'un voyageur et les émissions de CO<sub>2</sub> générées par la fréquence de ses voyages en avion. Ce phénomène s'est d'abord diffusé sur les réseaux sociaux et a pris de l'ampleur à partir d'octobre 2018. Entre cette date et janvier 2020, 312 millions de comptes Twitter ont évoqué le phénomène, notamment aux Etats-Unis, en Suède ou encore en France. Le pic de diffusion a eu lieu à l'été 2019 notamment avec le portrait de plusieurs personnalités comme Greta Thunberg qui ont refusé de prendre l'avion pour leurs déplacements internationaux. Le sujet s'est également diffusé dans l'opinion française plus tardivement que dans les pays nordiques et de manière concomitante a pu contribuer à l'engagement de certaines compagnies, comme Air France en octobre 2019, de compenser les émissions des vols domestiques [86].

1,73 gCO<sub>2</sub>eq en moyenne, un Transport Express Régional (TER) émet 24,81 gCO<sub>2</sub>eq [108]. Néanmoins ces derniers ne sont pas en concurrence avec l'avion puisqu'ils concernent des lignes régionales et/ou locales. Ils sont donc en concurrence avec des voitures ou des bus.

<sup>19</sup> Le commissariat général au développement durable définit la mobilité longue distance des personnes résidant en France métropolitaine comme une distance de plus de 100 kilomètre du domicile (soit 200 kilomètre minimum aller-retour) [111].

Dans la prolongation de ce mouvement, des initiatives comme *Stay on the ground* ont vu le jour. Manifeste diffusé en avril 2019 par le quotidien Libération, les signataires s'engagent à ne plus prendre l'avion du tout pour assurer leur déplacement. Ce réseau citoyen international regroupe 160 associations et collectifs, majoritairement basés en Europe, qui favorisent les échanges d'expérience et militent pour la réduction du transport aérien [113]. D'après une étude menée en 2019 et relayée par l'ADEME, 20 % des Français seraient prêts à ne plus jamais monter dans un avion pour réduire leur empreinte carbone et 15 % à ne plus quitter les frontières hexagonales [114].

L'impact de ces comportements éco-responsables a pu être mesuré à l'époque en Suède. En France, il n'est pas certain qu'il soit significativement répandu, au point d'affecter le niveau du trafic aérien à ce jour.

### 2.4.3. Une compétition sur d'autres critères

#### **D'autres critères induisent une concurrence entre l'avion et d'autres moyens de transport**

L'impact environnemental n'est pas le seul qui peut motiver les voyageurs à choisir un autre mode de transport que l'avion.

D'autres critères sont aussi mis en avant dans « Le [nouveau] parcours voyageur » de l'Association Française du Travel Management (AFTM) [115] tels que :

- **La distance parcourue et la durée du trajet** (Figure 44) ;
- **Le lieu de départ et d'arrivée** : les aéroports sont généralement excentrés, surtout pour certaines compagnies à bas-coûts, alors que les gares ferroviaires sont généralement situées en centre-ville ;
- **La flexibilité tarifaire et les conditions d'annulation** ;
- **La fréquence et diversité de l'offre** (il y a aujourd'hui plus de choix dans les compagnies aériennes que dans les compagnies ferroviaires actuellement en phase d'ouverture à la concurrence) ;
- **Le coût complet** d'un billet (le coût de l'aller / retour, auquel se rajoute le coût des bagages, du siège choisi et les frais supplémentaires...) et de l'acheminement (coût du billet auquel se rajoute le coût d'acheminement entre le lieu de résidence et le lieu d'embarquement). Ce coût complet est aussi dépendant de la diversité de l'offre : si les compagnies bas-coûts ont pu se développer et contribuer à la baisse du coût du transport aérien, c'est parce que le marché était ouvert ;
- **L'expérience utilisateur** : variété des services proposés (services à bord dans le cas de la plupart des compagnies aériennes, cartes d'abonnement et de fidélité donnant accès à des prix et des services), le stress généré pour le voyageur (temps de réservation à l'avance), la dématérialisation des titres de transport ;
- **Le temps de trajet utile** : il s'agit du temps réellement disponible pour le voyageur pour mener les activités souhaitées (travailler, se reposer, réfléchir...) sans les sollicitations imposées par le mode de transport. Dans le cas du transport aérien par exemple, le temps utile exclut le temps associé aux opérations de trajet vers l'aéroport, de check-in de contrôles, d'embarquement, de décollage et d'atterrissage et de trajet vers le centre-ville.

#### **Cas pratique du report modal des vols courts et moyens courriers vers le transport ferroviaire**

Le mode de transport le plus en compétition avec les vols court-courriers est le réseau rapide des Lignes à Grande Vitesse (LGV). Ce réseau connecte ainsi aujourd'hui de nombreuses grandes villes françaises, notamment depuis Paris, et est complété par le réseau des Transports Express Régionaux (TER) qui connecte ces grandes villes à de nombreuses villes de plus petite taille. Ces LGV concurrencent parfois les liaisons aériennes, et ce plus particulièrement pour les trajets de courte et de moyenne durée. En effet, les Trains à Grande Vitesse (TGV) sont plus confortables, et souvent plus pratiques et accessibles depuis les centres-villes, et les temps globaux sont généralement plus courts lorsque la durée du parcours en TGV est inférieure à trois heures [116]. La mise en service de la LGV entre Paris et Bordeaux a par exemple provoqué un recul du trafic aérien de 17 % entre 2017 et 2018 sur la liaison entre ces deux villes alors que la Société Nationale des Chemins de Fer (SNCF) revendique une hausse de 70 % du trafic passagers entre Paris et Bordeaux [117] sur la même période.

A noter que la capacité d'une mesure encourageant ou contraignant le report modal de l'avion vers un mode de transport moins émissif (notamment le train) à faire baisser les émissions de GES associées aux voyages dépend des effets de fuite et des rebonds engendrés par cette mesure (voir Partie 2.4.4 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** pour les effets rebonds). En effet, la suppression d'une ou plusieurs liaisons aériennes ou la diminution des fréquences de vol sur celles-ci peut conduire à plusieurs types différents d'effets de fuite, dont par exemple :

- Un report des voyages vers des aéroports non concernés par ces mesures (et plus particulièrement les aéroports étrangers limitrophes à la France en cas de mesure concernant l'ensemble du territoire national) ;

- Un changement dans les destinations des voyages, avec une diminution du tourisme en France et une augmentation du tourisme à l'étranger, et donc potentiellement à une hausse des émissions de GES.

#### **2.4.4. Le développement des trains de nuit et de l'intermodalité train-avion, deux solutions de lutte contre le changement climatique**

##### **L'attractivité du transport ferroviaire devrait être renforcée dans un futur proche avec le développement de trains de nuit et la fermeture de certaines lignes intérieures**

Le gouvernement souhaite l'instauration d'une dizaine de lignes de trains de nuits en France en 2030 [118]. L'Union Européenne a également signé un accord de coopération fin 2020 entre les compagnies de transport ferroviaire nationales allemandes, autrichiennes, françaises et suisses pour le redéploiement de trains de nuit transfrontaliers. Par ailleurs, la loi « Climat et Résilience » a interdit sous certaines conditions des vols domestiques quand une alternative en train existe en moins de 2h30 [119]. A noter que cette mesure est la traduction d'une proposition de la Convention Citoyenne pour le Climat (CCC) qui étendait cette durée à 4h [120].

##### **L'intermodalité train-avion, une autre solution pour lutter contre le changement climatique mais qui est confrontée à des obstacles qui entravent sa mise en œuvre**

Dans le cadre de la lutte contre le changement climatique, les pouvoirs publics peuvent chercher à développer l'intermodalité, c'est-à-dire la combinaison de différents modes de transport lors des voyages, afin de faire baisser l'impact carbone des trajets concernés. Pour ce faire, il est nécessaire de substituer au moins une partie des trajets en avions par d'autres modes de transport moins émissifs<sup>20</sup>, notamment le train, en mettant en place les infrastructures et correspondances nécessaires.

Cependant, il existe de nombreux freins au développement d'une l'intermodalité train-avion qui serait vertueuse du point de vue climatique. Le premier d'entre eux, pour ce qui est de la connectivité entre les flux aériens et ferroviaires, est le manque de cohérence sur les temporalités de mise en vente des billets. Pour les vols, les billets d'avion sont mis en vente plus d'un an à l'avance alors que les billets SNCF ne peuvent pas être achetés plus de 3 mois à l'avance<sup>21</sup>. Les autres freins au développement d'une telle intermodalité sont la gestion des bagages, la coordination des horaires et les garanties en termes de retard. Ce développement devra enfin prendre en compte les différences de préférences selon les types de voyageurs. Les voyageurs professionnels préfèrent ainsi des connexions plus courtes et des transferts facilités des bagages alors que les voyageurs touristiques préfèrent les connexions plus longues [121].

En plus de l'argument climatique, il convient de souligner que le développement de l'intermodalité train-avion peut être associé à des bénéfices économiques. En effet, celui-ci constitue une opportunité pour les compagnies aériennes d'augmenter leur nombre de destinations possibles, une possibilité pour les compagnies ferroviaires d'augmenter la rentabilité de certaines routes ferroviaires et de diversifier les profils de leurs clients, et pour l'hôtellerie et la restauration une activité renforcée en cas de recours à une nuit d'hébergement intermédiaire entre le trajet domestique et le vol international. Un possible effet rebond sur les trafics devra cependant être évité<sup>22</sup>.

Aujourd'hui en France, la majorité (66 %) du transport jusqu'aux aéroports se fait en voiture, 5 % en train et 23 % en transport en commun. Les chiffres sont similaires pour le moyen de transport utilisé pour rejoindre la destination finale, avec une place accrue de la voiture si la destination se trouve en dehors de la ville d'arrivée mais à moins de 200 km de celle-ci [53]. Le développement de l'intermodalité train-avion mais aussi des dessertes des aéroports en transports en commun contribuerait donc à diminuer les émissions de GES liées à ces trajets et donc aux voyages en avion.

## **2.5. Un secteur associé à d'autres impacts sur l'environnement**

Le secteur aérien est aussi associé à d'autres impacts environnementaux que le dérèglement climatique. Ces autres impacts font l'objet d'une analyse plus succincte dans les rapports sur le sujet et sont souvent plus difficilement quantifiables.

<sup>20</sup> Cette substitution est nécessaire pour éviter tout effet rebond, c'est-à-dire une augmentation des émissions liées à la création de correspondances train-avion. En effet, ces nouvelles correspondances peuvent rendre de nouvelles destinations plus accessibles et/ou raccourcir la durée de certains trajets, et donc conduire à une augmentation du niveau de trafic aérien, et donc des émissions de GES.

<sup>21</sup> A noter l'existence du programme TVG Air qui permet de réserver un seul billet pour combiner un vol international et un trajet TGV entre les aéroports parisiens et 20 autres gares.

<sup>22</sup> La facilitation de l'accès aux trajets internationaux par des solutions d'intermodalité train-avion pourrait conduire à une hausse de la demande, donc une hausse des émissions de GES.



Une analyse de ces autres impacts environnementaux est disponible en Partie 5.2, partie qui contient notamment une hiérarchisation de ceux-ci au vu de différents critères (la criticité actuelle de cet enjeu, la tendance observée ou projetée de l'évolution globale de l'enjeu, les impacts du secteur aérien sur cet enjeu par rapport au reste de l'économie et la marge de manœuvre du secteur aérien sur l'enjeu).

Aujourd'hui, les principaux impacts environnementaux associés au secteur aérien en dehors des émissions de CO<sub>2</sub> et des effets hors CO<sub>2</sub> sont les suivants :

- La **pollution de l'air** ;
- Les **nuisances sonores** ;
- **L'artificialisation des sols** ;
- Le **recul de la biodiversité** et des services écosystémiques.

Ces impacts sont des impacts locaux, qui ont lieu à proximité et sur les plateformes aéroportuaires.

A noter que l'ouverture d'une nouvelle liaison aérienne a moins d'impact sur la pollution de l'air, l'artificialisation des sols et la biodiversité que la construction d'une nouvelle infrastructure routière ou une nouvelle ligne à grande vitesse.

### 2.5.1. L'amélioration de la qualité de l'air sur les plateformes aéroportuaires, un objectif à poursuivre

#### Des plateformes aéroportuaires à l'origine de l'émission de nombreux polluants atmosphériques

Les aéroports sont la source de nombreuses émissions de différents polluants atmosphériques. En effet, la combustion de kérosène associée aux phases d'approche, de montée et de roulage des avions (Figure 46) conduit à des émissions de gaz à effet de serre (CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, SO<sub>2</sub>), mais aussi d'Oxydes d'Azote (NO<sub>x</sub>), de particules totales en suspension (TSP), de Composés Organiques Volatils (COV) et de Monoxyde de Carbone (CO) [6]. Par ailleurs, d'autres émissions sont causées par les activités des plateformes aéroportuaires et le trafic (notamment routier) induit par la desserte des aéroports (Figure 45) [122].

La qualité de l'air sur et à proximité des plateformes aéroportuaires est contrôlée par un réseau de 19 Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air (AASQA) et l'Autorité de Contrôle des Nuisances Aéroportuaires (ACNUSA) [123].



Figure 45 : Les sources d'émissions de polluants sur les plateformes aéroportuaires [122]

#### Des émissions causées en majorité par les avions lors du roulage

Les avions émettent en particulier ces polluants atmosphériques lors de la phase de LTO (Landing and Take-Off, voir Figure 46), notamment lors du roulage (par exemple de CO, COVNM et SO<sub>2</sub> du fait de la

combustion incomplète du kérosène)<sup>23</sup>, et lors de l'utilisation des Moteurs Auxiliaires de Puissance (APU). Ainsi, les avions représentent environ les trois-quarts des émissions de GES, de NOx et de TSP et environ 95 % des émissions de COV de l'ensemble des émissions émises par les avions et les activités aéroportuaires sur les 11 principaux aéroports français [124].

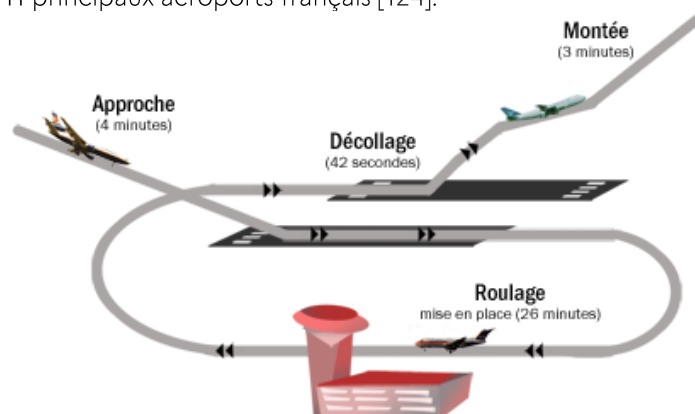


Figure 46 : Schéma des différentes phases d'un cycle LTO [125]

### **Des émissions qui stagnent, du fait de la hausse importante du trafic sur les 11 plus grands aéroports français**

Les 11 plus grands aéroports français ont communiqué à l'ADEME en 2017 leurs engagements et prévisions d'émissions de polluants atmosphériques pour 2020 et 2025, comparés à leur niveau de 2010. Le bilan publié par l'ADEME en 2018 fait apparaître que les objectifs de réduction des intensités d'émissions en GES et en polluants atmosphériques adoptés par ces aéroports respectent la cible fixée par la réglementation. Cependant, ce rapport souligne également que les niveaux d'émissions de NOx et de particules ne parvenaient pas à baisser à l'horizon 2025, du fait de la hausse importante du trafic aérien entre 2010 et 2025 sur l'ensemble de ces aéroports [124].

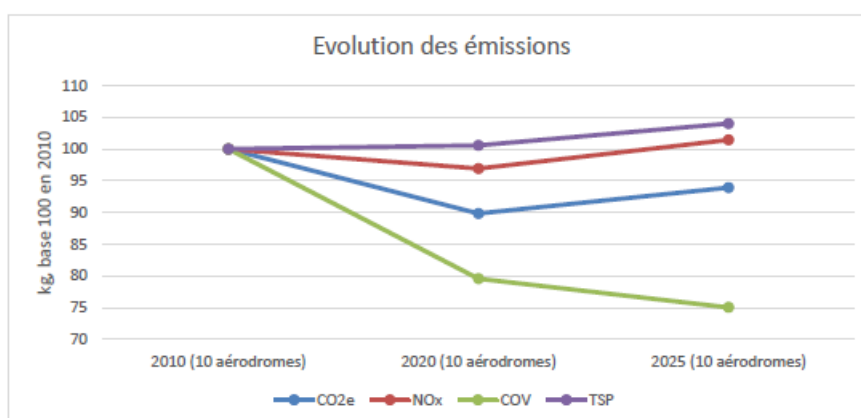


Figure 47 : Evolution des principaux polluants sur les 10 plus grands aéroports français [124]<sup>24</sup>

Néanmoins deux nuances sont à apporter sur ces conclusions :

- Les prévisions des aéroports ne tiennent compte ni de la chute du trafic en raison de la crise sanitaire ni des mesures mises en place ou en projet visant à améliorer la qualité de l'air (réglementation temps d'utilisation des APU, dispositif suramortissement véhicule, réduction de la Taxe Intérieure sur la Consommation Finale d'Electricité (TICFE)...) ;
- La métrique est différente entre les cibles dans la Loi de Transition Energétique pour la Croissance Verte (qui sont en émissions unitaires) et ces résultats (qui sont en émissions absolues).

### **2.5.2. Des plateformes aéroportuaires à l'origine d'importantes nuisances sonores**

Les vols sont à l'origine d'importantes nuisances sonores à proximité des aéroports, notamment pendant les phases de décollage et d'atterrissage et lors des vols nocturnes. Leur réduction, primordiale pour améliorer la qualité de vie des riverains des aéroports, est visée par plusieurs dispositifs.

<sup>23</sup> A noter que les NOx et le N<sub>2</sub>O sont très majoritairement émis pendant le décollage des avions.

<sup>24</sup> L'aéroport de Nantes-Atlantique n'est pas inclus dans ce graphique faute de données [124].



Une partie des réductions du bruit à proximité des aéroports provient de progrès technologiques sur les moteurs et sur les avions, via le renouvellement des flottes par les compagnies aériennes. Il est en effet aujourd'hui considéré que chaque génération d'appareil est 15 % moins bruyante que la génération précédente [126].

Les compagnies aériennes et aéroports peuvent ainsi mettre en place un certain nombre de procédures pour réduire l'exposition aux bruits des populations riveraines des aéroports, comme les descentes continues, le relèvement des altitudes d'arrivée ou une meilleure gestion des vols nocturnes [127]. Les descentes continues ne peuvent pas être généralisées à tous les aéroports français pour des questions de sécurité, néanmoins le recours à celles-ci se développe en France. Elles devraient par exemple être généralisées pour l'aéroport Paris-Charles de Gaulle en 2024 [123].

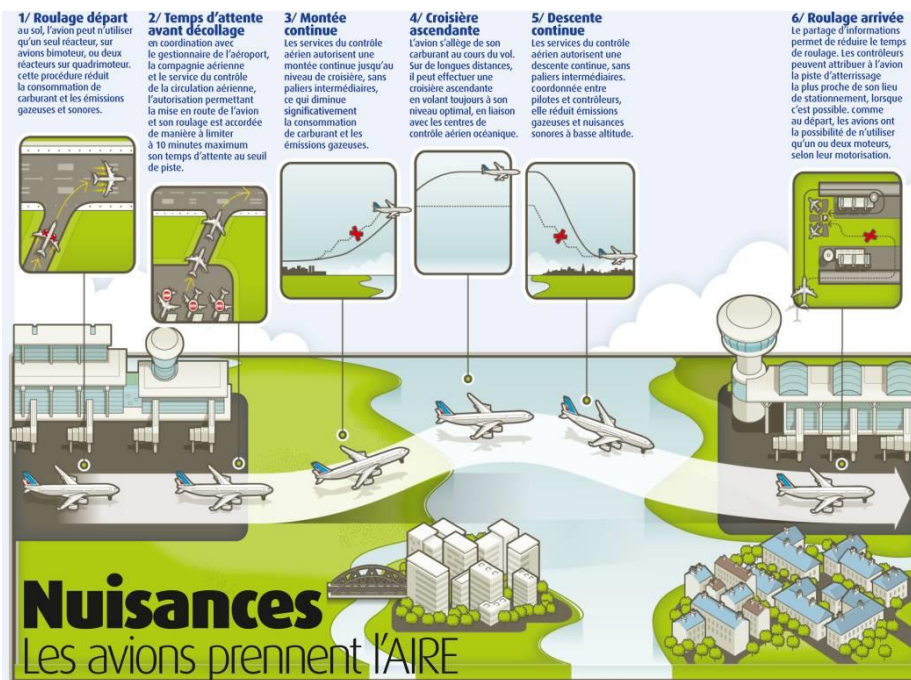


Figure 48 : Exemples de mesures pouvant être prises par les aéroports et les compagnies aériennes pour limiter les nuisances à proximités des aéroports (1/2) [127]

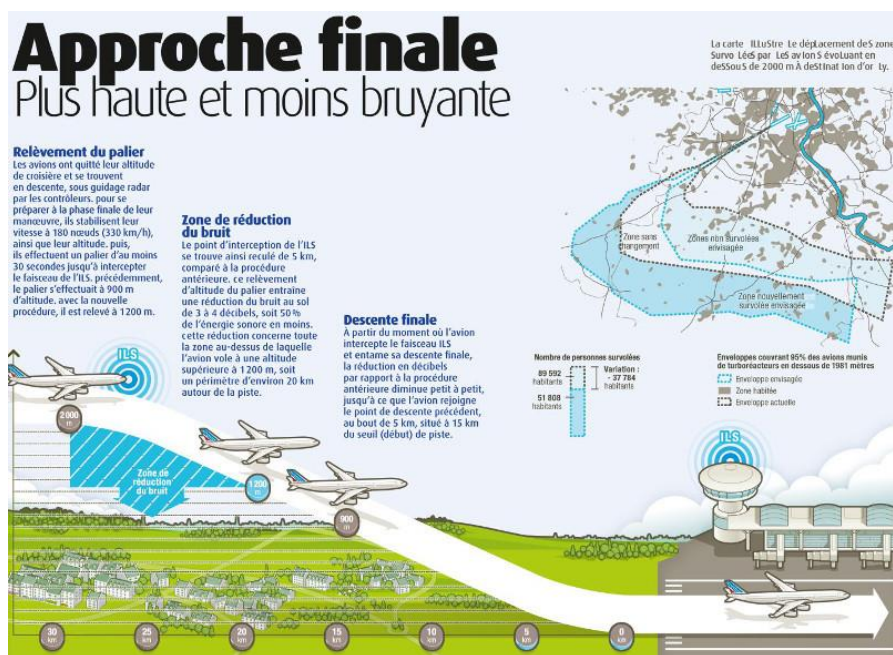


Figure 49 : Exemples de mesures pouvant être prises par les aéroports et les compagnies aériennes pour limiter les nuisances à proximités des aéroports (2/2) [127]

Il existe en outre plusieurs plans et dispositifs en France pour réduire l'exposition des populations riveraines des aéroports au bruit. Le premier d'entre eux sont les Plans de Gêne Sonore (PGS) qui sont

obligatoires pour les 12 principaux aéroports Français. Ces plans définissent des zones dans lesquelles les riverains peuvent bénéficier d'une aide à l'insonorisation de leur logement sous certaines conditions [122]. Ces aides sont financées par les compagnies aérienne qui s'acquittent de la Taxe sur les Nuisances Sonores Aériennes (TNSA) dont les tarifs ont été augmentés en 2018 [123].

Les communes à proximité des aéroports doivent de plus respecter les Plans d'Exposition au Bruit (PEB) qui sont élaborés par les services déconcentrés de l'Etat sous l'autorité du préfet. Ces plans visent à interdire ou limiter les constructions pour ne pas augmenter les populations soumises aux nuisances. Ils anticipent à l'horizon 15/20 ans le développement de l'activité aérienne, l'extension des infrastructures et les évolutions des procédures de circulation aérienne [122]. Les nouveaux locataires et acquéreurs d'un bien immobilier dans une zone soumise à un PEB doivent être informés de celui-ci et de l'importance de l'exposition à laquelle ils s'exposent [128].

Par ailleurs, un Plan de Prévention du Bruit dans l'Environnement (PPBE) établit tous les cinq ans un état des lieux et mobilise plusieurs dispositifs de maîtrise de ces nuisances, pour les aérodromes dont le trafic annuel dépasse 50 000 mouvements.

### **2.5.3. Les aéroports et la biodiversité**

L'impact du secteur aérien sur la biodiversité est lié à celui des aéroports sur l'artificialisation des sols. En effet, ce phénomène, qui consiste à transformer des espaces naturels, agricoles et forestiers en des espaces artificiels (des pistes, des terminaux, parkings de stationnement des avions, des prairies...) est un des principaux facteurs d'érosion de la biodiversité [129]. A cela s'ajoutent le bruit, la pollution lumineuse, et la pollution de l'air qui perturbent la vie animale.

Les aéroports existants, qui occupent aujourd'hui une surface équivalente à 5 fois la taille de la ville de Paris, sont composés à 70 % de prairies aéronautiques. Ces prairies abritent une faune et une flore constitutive des écosystèmes locaux et font partie de trames vertes pour la dissémination des espèces. Pour assurer la protection de cette biodiversité mais également la sécurité aéroportuaire, les exploitants d'aéroports sont accompagnés par la Direction Générale de l'Aviation Civile (DGAC) et le Service technique de l'aviation civile. La gestion des écosystèmes qui évite la prolifération de certaines espèces contribue fortement à renforcer la sécurité des aéroports par la prévention du péril animalier [130].

Depuis 7 ans, avec le soutien de la DGAC, du Muséum national d'Histoire naturelle et de quelques aérodromes pionniers, Aéro Biodiversité œuvre à une meilleure connaissance et protection de la biodiversité sur les aéroports en France métropolitaine et outre-mer. Sa démarche est portée par des naturalistes professionnels, salariés de l'association. Son action repose en grande partie sur les protocoles en science participative.

En 7 années, l'association a réalisé plus de 9 000 observations d'invertébrés, recensé plus de 1 400 espèces de plantes, observé plus de 260 espèces d'oiseaux, enregistré près de 30 espèces de chiroptères, une vingtaine d'espèces de reptiles et une quinzaine d'espèces d'amphibiens.

Aéro Biodiversité compte désormais 37 plateformes partenaires en 2021 contre 22 en 2020. En 2021, les naturalistes d'Aéro Biodiversité ont mené un nombre record de visites de terrain avec 508 jours-personne réalisés. [131]

Les aéroports français actuels pourraient ainsi être des sources de biodiversité. Cependant, en 2021, 10 aéroports français avaient des projets d'extension en cours ou à l'étude. Ces extensions faites à l'intérieur même de leur périmètre [132], pourraient conduire à une diminution de la biodiversité locale et à de nouvelles émissions de GES si des prairies aéronautiques étaient artificialisées. Certains de ces projets d'extensions pourraient être revus suite à la publication du décret d'application de l'article 146 de la loi climat limitant les projets de travaux et d'ouvrages de création ou d'extension d'aérogares [133].

## **2.6. Un secteur économique dont certains acteurs sont confrontés à des enjeux de rentabilité**

Le secteur aéronautique représente 4,1 % du PIB mondial et 88 millions d'emplois (directs, indirects, induits et catalytiques). En France, le secteur aérien représente 4,3 % du PIB (101 milliards de dollars de chiffre d'affaires en 2019), 322 000 emplois directs et 311 000 emplois indirects [1]. Il s'agit donc d'un secteur à forte importance économique au niveau national notamment.

### 2.6.1. Une filière composée de nombreux acteurs et très concentrée mais qui repose également sur de très nombreux petits sous-traitants

Les compagnies aériennes historiques se sont en majorité regroupées au sein d'**alliances** afin de bénéficier d'économies d'échelle importantes. En 2019, 3 alliances mondiales, Star Alliance, Oneworld et SkyTeam se partageaient plus de 82 % du trafic mondial de passagers, dont 74 % pour Star Alliance [134]. Ces compagnies sont aujourd'hui de plus en plus concurrencées par les compagnies à bas coûts. La part de marché des compagnies aériennes à bas coûts a ainsi cru de 61 % entre 2007 et 2016 [135], et celle-ci s'élevait à 40 % en 2019 en Europe (certaines compagnies à bas coûts faisant partie d'une des alliances citées précédemment) [136].

La majorité des compagnies aériennes d'Etat ont été privatisées, tout comme de nombreux aéroports et fournisseurs de services de navigation aérienne (ANSP pour Air Navigation Service Provider) auparavant gérés par les pouvoirs publics. Il existe ainsi aujourd'hui une soixantaine d'ANSP autonomes dans le monde. La première décennie des années 2000 a aussi vu le développement des activités de locations d'appareil entre compagnies aériennes pour des raisons économiques et de flexibilité. En 2011, sur les 4 plus gros propriétaires d'avions, deux étaient des loueurs : General Electric Capital Aviation Services et International Lease Finance Corporation [137]. En 2019, ceux-ci possédaient environ 45 % des appareils en circulation et cette tendance était en légère augmentation avant la crise sanitaire [138].

Pour ce qui est des **constructeurs d'avions**, la quasi-totalité du marché est répartie entre Airbus et Boeing pour les aéronefs commerciaux. En 2018, ces deux entreprises ont reçu environ 1600 commandes chacune et livré 1640 avions [139][140]. Pour les avions plus petits, ce sont Embraer, Bombardier et ATR qui dominent le secteur. Ces entreprises font appel à une myriade de (petits) sous-traitants (par exemple Airbus en compte 12 000 [15]).

Les **activités de maintenance, réparation et révision** (MRO) sont dominées par le secteur « moteur » à 40 %. Il est estimé que 30 à 50 % du travail des MRO est effectué par des sous-traitants extérieurs aux compagnies aériennes, sous-traitants qui sont en général des constructeurs des pièces d'origine. Les grandes compagnies comme Air France ont des services indépendants et internes à l'entreprise [137].

Pour le carburant, les fournisseurs fixent les prix directement sur le cours mondial du pétrole. Ces derniers sont donc sujets à de fortes fluctuations avec une tendance à la hausse.

Les fournisseurs de services d'escale font le lien entre l'infrastructure aéroportuaire et les passagers. Ils s'occupent des salles d'embarquement, du nettoyage des cabines ou encore de la restauration pendant le vol. Ils peuvent être contrôlés par la compagnie aérienne (qui peut soit internaliser ces services soit les sous-traiter), par les exploitants d'aéroports ou encore par des services indépendants comme Menzies Aviation Group, Servisair ou Swissport International. Enfin, les systèmes informatisés de réservation sont vendus par 3 principaux acteurs : Amadeus, Sabre et Travelport. Ces entreprises sont également souvent possesseurs d'agence de voyage en ligne [137].

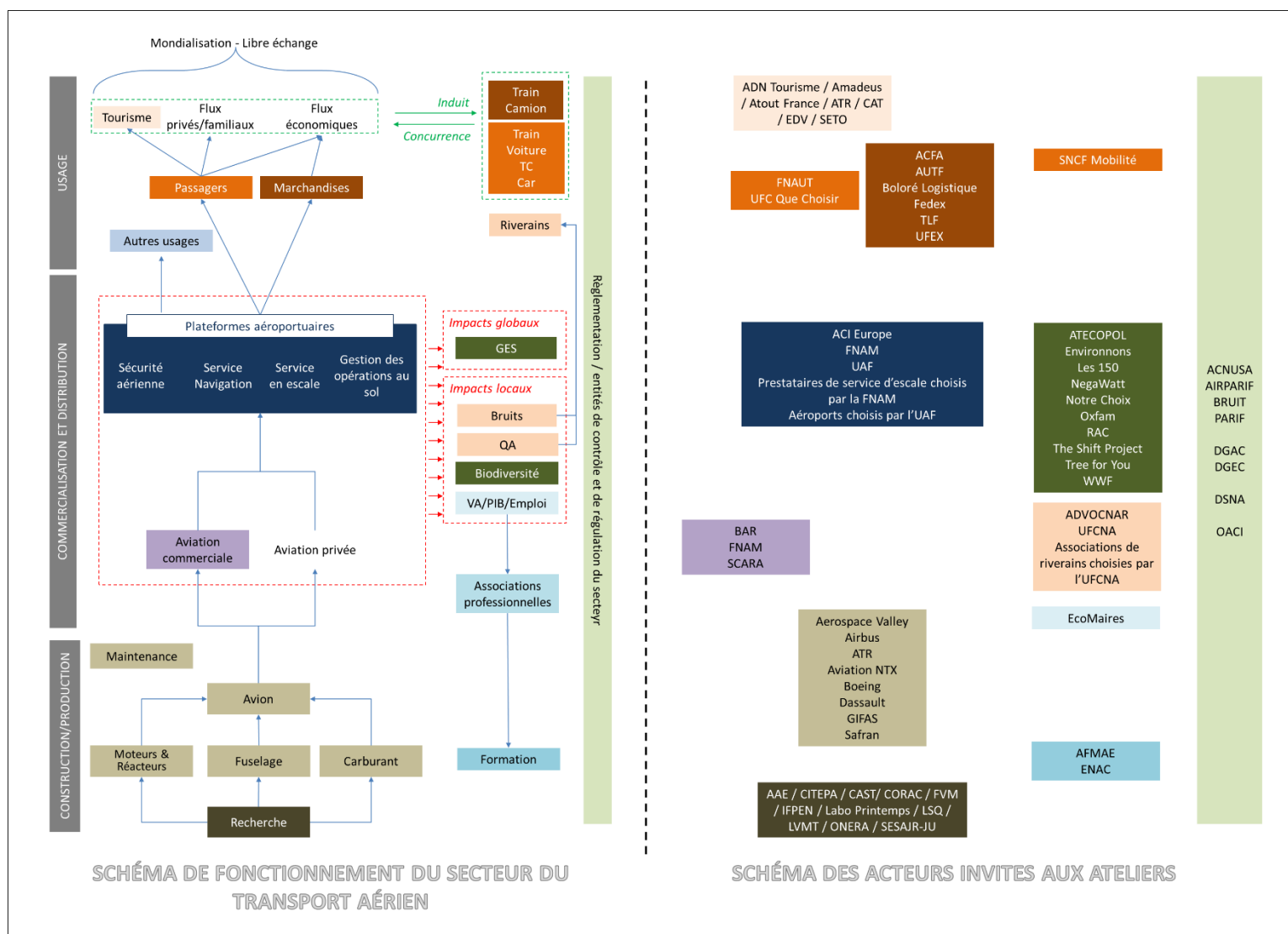


Figure 50 : Schéma de fonctionnement du secteur du transport aérien et exemple d'acteurs correspondants



## 2.6.2. Un secteur structuré par de grandes organisations

### 2.6.2.1. Des organisations au niveau international

Les vols internationaux représentent 60 % des émissions de CO<sub>2</sub> du secteur de l'aérien au niveau mondial [141], et 78 % des émissions de CO<sub>2</sub> du secteur en France [6]. Notons que le premier chiffre comptabilise l'intégralité des vols internationaux dans l'intégralité du trafic mondial, alors que le deuxième ne comptabilise que les vols internationaux au départ de la France (et non ceux à l'arrivée en France) : la part des émissions des vols internationaux serait donc de 88 % si l'on comptabilisait les vols également les vols à l'arrivée. Ces chiffres illustrent l'importance des organisations internationales qui permettent d'harmoniser les pratiques et les réglementations entre pays. Il en existe plusieurs, de différentes natures : l'OACI, l'ATAG, la TIACA, l'IATA, l'ACI, l'EASA...

#### **L'OACI (Organisation de l'Aviation Civile Internationale), une organisation qui fixe les normes internationales du secteur**

La compétence de l'OACI sur le sujet du transport aérien dépend du bon vouloir de ses Etats membres. En effet, au niveau international, les règles du secteur aérien sont édictées par l'OACI, l'Organisation de l'Aviation Civile Internationale, rattachée à l'Organisation des Nations Unies. Financée par 193 gouvernements, signataires de la Convention de Chicago, l'organisation a pour but de promouvoir la coopération et de « créer et préserver entre les nations et les peuples du monde l'amitié et la compréhension ». Cet accord définit les principes qui permettent le transport aérien et l'organisation cherche à favoriser les innovations en matière de politique et de normalisation du secteur. Au fur et à mesure que de nouvelles problématiques sont identifiées, le secrétariat de l'OACI réunit les parties prenantes et des experts afin de discuter des aspects techniques, politiques, socio-économiques des enjeux. Les résultats sont présentés aux gouvernements qui par la suite produisent un consensus autour d'une nouvelle norme qui a pour but d'harmoniser les législations nationales des 193 pays signataires.

Il est important de noter que les règles édictées par l'OACI ne peuvent pas se substituer à des exigences réglementaires nationales. Les organismes de l'Organisation des Nations Unies n'ont aucune autorité sur les gouvernements. L'OACI fonctionne sur la base d'une reconnaissance mutuelle des Etats qui s'engagent à respecter et à faire respecter les normes communes par les opérateurs dont ils ont la tutelle. En cas de non-respect d'une réglementation édictée par l'OACI par un Etat signataire, la procédure suivie est celle d'une procédure de règlement des conflits telle que définie dans le traité fondateur.

Les réglementations mises en place par l'OACI sont multiples et concernent des domaines variés : les corridors de navigation aérienne, la sécurité, les normes environnementales des aéronefs, la formation du personnel volant et au sol.

L'OACI s'est fixé des **objectifs environnementaux** concernant le bruit, la pollution de l'air et le réchauffement climatique. Du point de vue de la protection de l'environnement, l'OACI a adopté en 2004 3 grands objectifs :

- Limiter ou réduire le nombre de personnes exposées à un niveau élevé de bruit des aéronefs ;
- Limiter ou réduire l'incidence des émissions de l'aviation sur la qualité de l'air locale ;
- Limiter ou réduire l'incidence des émissions de gaz à effet de serre de l'aviation sur le climat mondial.

Ces engagements sont en cours de révision, et de nouveaux engagements (Long Term Aspirational Goals ou LTAG) devraient être adoptés lors de la 41<sup>ème</sup> assemblée de l'OACI à l'automne 2022 [22].

Par la suite, les objectifs environnementaux de l'OACI ont été précisés avec notamment une volonté d'amélioration annuelle de l'efficacité énergétique des aéronefs (mesurée en carburant consommé par passager et par kilomètre) de 2 % jusqu'en 2050, une croissance neutre en carbone<sup>25</sup> à partir de 2020 (Figure 51). Comme précisé en Partie 1.1, de nouveaux objectifs (Long Term Aspirational Goals) doivent être adoptés lors de la 41<sup>ème</sup> assemblée de l'OACI à l'automne 2022.

L'OACI **promeut les progrès techniques et opérationnels** pour atteindre ses objectifs. En effet, les améliorations d'efficacité énergétique des avions au cours des dernières années ont été encouragées par les normes et réglementations fixées par l'OACI, et plus particulièrement par le Comité de la Protection de l'Environnement en Aviation (CAEP), qui est composé de membres et d'observateurs des Etats membres mais aussi d'organisations représentant l'industrie de l'aviation et le secteur environnemental. Les réglementations qui ont été peu à peu mises en place concernent en particulier le bruit des aéronefs,

---

<sup>25</sup> Voir Annexe 2 pour un commentaire sur ces engagements.

les standards technologiques des avions et des moteurs, notamment sur les émissions de GES et de polluants atmosphériques, l'évaluation environnementale des aéroports, les carburants alternatifs [142].

Les principales mesures mises en place par l'OACI pour atteindre ses objectifs sont donc avant tout techniques et opérationnelles. C'est donc dans ce contexte que s'est inscrite la participation de l'OACI au World Economic Forum de janvier 2021. Au cours d'une session intitulée « Building a Path to Net-Zero Aviation », la secrétaire générale de l'OACI a mis l'accent sur les mesures pouvant être prises par l'aviation internationale pour devenir plus durable et plus résiliente. Les discussions qui ont eu lieu lors du symposium sur l'innovation ont notamment porté sur des solutions comme les propulsions hybrides, électriques et à hydrogène, la densité énergétique des batteries ou l'utilisation de carburants durables. L'OACI souligne l'importance de favoriser les partenariats et considère la COVID-19 comme une opportunité pour accélérer la transition vers un avenir décarboné. L'organisation s'attend à des changements structurels importants du secteur, notamment sur la structure de la demande [143][144].

En parallèle de l'amélioration des opérations et des progrès techniques, l'OACI s'est engagée dans une meilleure prise en compte du **prix du carbone** par les acteurs de la filière. C'est dans cette optique que l'organisation a mis en place le régime CORSIA qui est un régime de compensation des émissions (voir Annexe 2) de CO<sub>2</sub> sur les vols internationaux. Adopté en 2016, il fonctionne sur le volontariat des Etats jusqu'en 2026. Par la suite, tous les Etats dont la part individuelle des activités de l'aviation internationale pour 2018 est supérieure à 0,5 % du total mondial ou dont la part cumulative atteint 90 % du total mondial devront se conformer au système CORSIA [145].

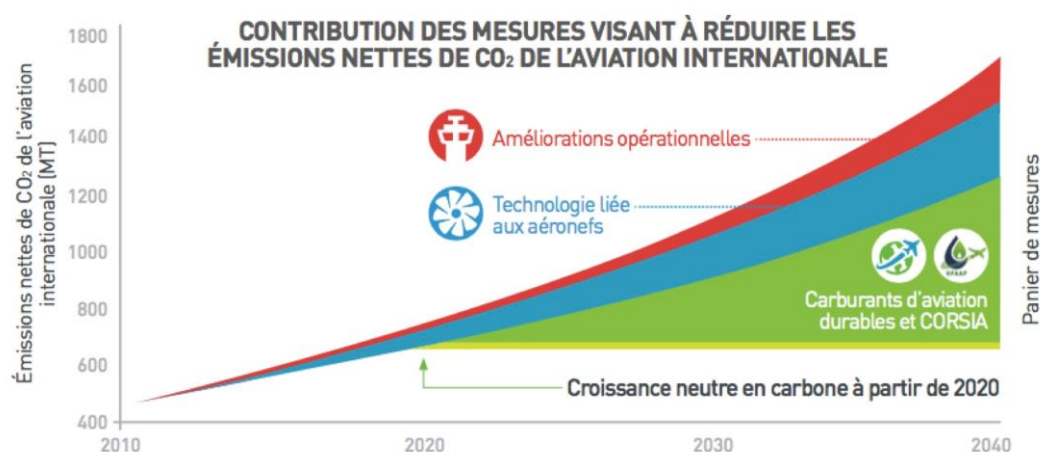


Figure 51 : Contribution des mesures visant à réduire les émissions nettes de CO<sub>2</sub> de l'aviation internationale [146]

Le principe de fonctionnement de CORSIA est le suivant : les compagnies aériennes doivent compenser les émissions supplémentaires produites par rapport aux émissions de 2020, ce qui doit permettre à l'OACI d'atteindre son objectif de croissance neutre en carbone à partir de 2020. En raison de la pandémie de COVID-19 qui a fortement réduit le trafic aérien mondial (en PKTeq), les émissions utilisées comme référence seront finalement celles de 2019 et non celles de 2020. 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. De celles-ci sont déduits les avantages liés à l'utilisation de carburants alternatifs. Après avoir reçu le montant final d'émission à compenser, l'exploitant doit acheter puis annuler des unités d'émissions par des projets éligibles de compensation et de séquestration du carbone. À l'inverse du marché du carbone européen (l'EU ETS pour European Trading System), l'objectif de CORSIA n'est pas de réduire les émissions mais de les « stabiliser » au niveau de 2019<sup>26</sup> via la compensation des émissions excédentaires. L'articulation entre les deux systèmes sera traitée dans le cadre de la révision de la directive ETS-Aviation publiée par la Commission le 14 juillet 2021 dans le cadre du Paquet Fit for 55 et en cours de négociation à Bruxelles [145].

### **L'ATAG (Air Transport Action Group), une organisation qui représente l'ensemble des branches de l'industrie du transport aérien**

L'ATAG est le Groupe d'Action pour le Transport Aérien, il a pour but de mettre à disposition une plateforme qui permet la collaboration des acteurs du secteur afin de travailler sur les enjeux de long terme de celui-ci. Elle représente à la fois les aéroports, les compagnies aériennes, les constructeurs, les fournisseurs de services de navigation aérienne, les compagnies de location, les pilotes, les contrôleurs

<sup>26</sup> A noter que la capacité de ce mécanisme à atteindre cet objectif est remise en cause, notamment par la société civile pour diverses raisons. Voir par exemple l'analyse du Climate Action Tracker sur ce sujet [147].



aériens, les associations, les partenaires touristiques, les équipes au sol... L'objectif est d'englober l'ensemble de la chaîne de valeur de l'industrie aéronautique pour s'adresser aux décideurs politiques et représenter les intérêts du secteur aérien de la manière la plus large possible. Il est composé d'une quarantaine d'organisations à travers le monde [148].

#### **Des entreprises du secteur du fret aérien regroupées au sein de la TIACA (The International Air Cargo Association)**

Lancée dans les années 1990, la TIACA est l'Organisation Internationale pour le Transport de Fret. Elle soutient, informe et met en relation des entreprises et des organisations pour développer l'industrie du fret aérien et l'adapter aux nouveaux enjeux. Elle essaie de porter une voix unifiée au niveau mondial pour développer un service efficace et moderne. La TIACA travaille notamment à l'élaboration des normes et informe les pouvoirs publics sur les intérêts du secteur, sur son importance, ses évolutions et ses perspectives [149].

#### **L'IATA, une association qui rassemble la plupart des compagnies aériennes mondiales**

L'IATA (International Air Transport Association) est l'Organisation Internationale du Transport Aérien. Fondée en 1945, elle regroupe 290 compagnies, réparties sur 120 pays qui représentaient 82 % du trafic mondial. Les entreprises qui en sont membres sont autorisées à consulter les prix entre elles par l'intermédiaire de cet organisme. Elle est aussi à l'origine de la simplification des facturations entre les compagnies aériennes et les agents de voyage ou les transitaires/agents de fret. Ses missions sont de représenter les compagnies aériennes devant les décideurs publics. Elle œuvre aussi pour le développement et l'amélioration du service, en réduisant les coûts et en améliorant l'efficacité [150]. Peu de compagnies à bas-coûts en sont membres (c'est notamment le cas de Volotea et Vueling mais Easyjet, Ryanair, Transavia n'en font pas partie par exemple)[151]

#### **L'ACI, un conseil représentant les intérêts des aéroports**

Créé en 1991, l'ACI (Airport Council International) est le Conseil International des Aéroports qui est la première association mondiale à représenter leurs intérêts communs et à favoriser la coopération avec des partenaires de l'industrie du transport aérien. L'association a permis d'unifier la voix de ces acteurs afin de porter leurs intérêts dans les organisations internationales. Elle recommande des pratiques en termes de sûreté, de sécurité et d'environnement [152].

#### **L'EASA, une agence européenne en charge de la sécurité et de la protection de l'environnement dans l'aviation civile**

Au niveau européen, c'est l'Agence de l'Union Européenne pour la Sécurité Aérienne (EASA) qui est en charge de veiller à la sécurité et à la protection de l'environnement dans l'aviation civile. Elle est composée des 27 membres de l'UE auxquels s'ajoutent l'Islande, le Liechtenstein, la Norvège et la Suisse. Ses activités sont multiples mais elle permet entre autres d'harmoniser les réglementations, de délivrer des certifications, d'élaborer des règles techniques, de superviser la sécurité et de développer le marché unique du transport aérien en Europe [153].

### **2.6.2.2. Une organisation au niveau national**

#### **La DGAC : l'autorité de régulation française du secteur aérien**

En France, l'aviation civile est soumise au contrôle de la Direction Générale de l'Aviation Civile (DGAC), autorité rattachée au Ministère de la Transition Ecologique (MTE). Ses missions s'articulent autour de :

- La sécurité et de la sûreté du transport aérien pour l'ensemble des acteurs ;
- La navigation aérienne ;
- La régulation du transport aérien, notamment dans la gestion économique et sociale du secteur ;
- La défense de la position française à l'international ;
- La transition écologique ;
- Le déploiement de l'aviation légère et des hélicoptères ;
- La formation des professionnels de l'aérien.

Elle met notamment en place des procédures de certification, d'agrément d'exploitation et de contrôle, appliqués sur l'ensemble de la chaîne de valeur du secteur.

#### **La SNTA, une stratégie qui vise à diminuer les impacts négatifs du secteur aérien**

En 2018, la DGAC a mené les Assises du transport aérien qui ont permis l'élaboration de la Stratégie Nationale du Transport Aérien (SNTA) 2025. L'objectif est de définir les orientations pour un transport aérien français et durable. Cette stratégie est définie selon 4 modalités : la transition écologique du secteur, la performance du transport, le maintien de la connexion entre les territoires et l'adaptation aux transformations futures. Le volet proprement environnemental s'articule autour de 5 piliers : la décarbonation, les impacts en matière de bruit et de qualité de l'air, les interactions avec l'ensemble des parties prenantes, le maintien de la biodiversité, l'accompagnement de l'émergence de nouveaux enjeux environnementaux [154].

### 2.6.3. Des compagnies aériennes confrontées à des enjeux de rentabilité

#### **Un secteur à gros volume mais faible marge dont la rentabilité dépend des cours du pétrole et des taux de remplissage des avions**

Le défi majeur des compagnies aériennes est la hausse de leurs coûts d'exploitation, et plus particulièrement ceux liés aux carburants, qui impactent leur rentabilité. Les dépenses en carburant sont très dépendantes de l'évolution des cours du pétrole. Elles représentaient 23,7 % des dépenses des compagnies aériennes en 2019 [155].

Le secteur aérien est un secteur à gros volume mais à faible marge, du fait notamment de la faiblesse des barrières à l'entrée. Leurs coûts fixes (salaires, loyers des avions, entretiens de ceux-ci et dette) sont importants et représentent environ 50 % des coûts de fonctionnement d'une compagnie classique. La rentabilité des compagnies aériennes est donc fortement dépendante des cours du carburant, mais aussi du taux de remplissage de leurs avions [136].

#### **Des compagnies historiques européennes moins rentables que leurs homologues américaines et qui sont très fortement concurrencées par les compagnies à bas coûts<sup>27</sup>**

Les compagnies aériennes européennes sont globalement rentables, mais moins que leurs homologues américaines (marge bénéficiaire après impôt de 4,7 % au lieu de 5,5 % [156]). Cette différence de rentabilité s'explique notamment par la plus faible concentration du marché et la présence de nombreux acteurs de petite taille en Europe [136]. Cette performance plutôt bonne masque le fait que de nombreuses compagnies aériennes sont juste au-dessous du seuil de rentabilité ou subissent des pertes [155].

Les compagnies aériennes continuent à créer de la valeur pour les investisseurs mais avec un ROIC (Retour sur l'investissement en capital) de seulement 7,4 %, ce qui est très légèrement au-dessus du coût du capital. Même si certaines compagnies aériennes continuent de générer des flux de trésorerie disponible, ce n'est pas le cas de la totalité d'entre elles, ce qui explique l'augmentation année après année de leurs ratios d'endettement [61].

Les compagnies aériennes historiques subissent enfin une très forte concurrence de la part des compagnies à bas-coûts comme Ryanair qui représentent aujourd'hui 40 % du marché européen. Les activités court-moyen courrier d'Air France et de Lufthansa sont ainsi structurellement déficitaires depuis plusieurs années du fait de cette concurrence [136].

### 2.6.4. Investissements économiques nécessaires à venir pour atteindre les objectifs du secteur

Afin de pouvoir diminuer rapidement et significativement ses émissions de GES de manière cohérente avec l'Accord de Paris, le secteur aérien va devoir réaliser des investissements économiques massifs dans les années à venir.

Tout d'abord, de grands montants seront nécessaires pour permettre **d'améliorer l'efficacité énergétique des flottes**. Ceci nécessite des investissements de la part du secteur de la construction aéronautique dans la Recherche et le Développement de nouvelles générations d'appareils plus performants et pouvant embarquer des énergies alternatives (électricité et hydrogène notamment), mais aussi des investissements de la part des compagnies aériennes pour renouveler leurs flottes via l'achat de nouveaux avions plus modernes (Partie 3.3).

Dans ce sens, le gouvernement français a accordé 15 milliards d'euros en 2020 au secteur aérien dans le cadre du Plan « France Relance », dont 1,5 milliards d'euros consacrés à la Recherche et au Développement aéronautique, avec pour objectif de faire de la France l'un des pays les plus avancés dans les technologies de l'avion « vert » (Partie 2.2.3).

Des investissements sont aussi à prévoir dans le **développement de filières industrielles de production et d'approvisionnement des carburants alternatifs** au kérosène, que ce soient les Carburants d'Aviation Durables (les biocarburants d'aviation durables et les électrocarburants) ou l'hydrogène bas-carbone. Aujourd'hui, ces filières ne sont que peu développées et ne sont pas encore structurées pour autoriser leur passage à l'échelle. Il s'agit donc d'investir dès aujourd'hui pour permettre de s'appuyer sur ces leviers au rythme proposé par le secteur (Partie 3.2).

Par ailleurs, les dépenses des compagnies aériennes risquent d'augmenter en lien avec :

---

<sup>27</sup> A noter que ce paragraphe est basé sur des données antérieures à la pandémie de Covid-19.

- La mise en œuvre du mécanisme de compensation CORSIA (Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation) au niveau international ;
- La diminution progressive des quantités de quotas d'émissions distribuées gratuitement dans le cadre de l'EU ETS (European Union Emissions Trading System) au niveau Européen ;
- La compensation obligatoire des émissions des vols domestiques (article 147 de la loi Climat & Résilience) au niveau Français ;
- La compensation volontaire effectuée par les compagnies aériennes pour atteindre leurs propres objectifs climatiques.

Finalement, afin de rendre l'industrie aéronautique plus résiliente et notamment dans l'hypothèse où son activité devrait décliner, des investissements seront nécessaires afin **d'accompagner la diversification du secteur** (Partie 6.2.2). Le collectif Pensons d'Aéronautique pour Demain a étudié des pistes de réflexion pour diversifier notamment le bassin Toulousain qui s'est développé sur cette « mono-industrie » afin de lui éviter le « syndrome Détroit »<sup>28</sup>. Différents projets sont mentionnés : le développement d'un pôle régional du ferroviaire, la participation aux métiers agricoles en polyactivité, développer une industrie au service de l'économie de la fonctionnalité, valoriser des déchets de l'aéronautique (réemploi, revalorisation, réparation et recyclage), concevoir un smartphone utilisable 30 ans... [157]. Ce sont des idées et des projets balbutiants mais qui nécessiteront des investissements importants s'ils venaient à être développés.

---

<sup>28</sup> La ville de Détroit aux Etats-Unis d'Amérique s'est spécialisée dans l'industrie automobile en devenant dépendante de ce secteur et elle est en déclin depuis les années 1970 à cause de ce développement mono-industriel.

### 3. UN SECTEUR QUI PEUT JOUER SUR DE NOMBREUX LEVIERS POUR SE DECARBONER

#### 3.1. L'équation de Kaya appliquée au secteur du transport aérien

Le chercheur japonais Yoichi Kaya a proposé en 1990 une approche permettant de décomposer les émissions de CO<sub>2</sub> d'un pays en différents facteurs contribuant à la hausse de ces émissions. Cette approche, appelée « identité de Kaya » se décompose comme suit :

$$CO_2 = \frac{CO_2}{Energie} (1) * \frac{Energie}{PIB} (2) * \frac{PIB}{Population} (3) * Population (4)$$

Cette équation permet d'identifier quatre leviers qui impactent les émissions de CO<sub>2</sub> : l'intensité carbone de l'énergie (1), l'efficacité énergétique de l'économie (2), le Produit Intérieur Brut (PIB) par personne (3) et la quantité de population (4).

Cette décomposition a par la suite été appliquée au secteur des transports afin d'identifier les différents leviers d'action du secteur qu'une entité peut activer pour se décarboner. Il s'agit de l'équation suivante :

$$CO_{2,Transport} = \sum_{i=mode} \frac{CO_{2,i}}{Energie_i} (1) * \frac{Energie_i}{Véhicules_i} (2) * \frac{Véhicules_i}{Demande_i} (3) * \frac{Demande_i}{Demande} (4) * Demande (5)$$

Cette équation représente la décomposition des leviers d'action pour chaque mode de transport :

- **Levier (1) : L'intensité carbone de l'énergie utilisée** représente la quantité d'émission de CO<sub>2</sub> par unité d'énergie consommée. Cette valeur varie en fonction de la source d'énergie considérée. Elle est comptabilisée en tCO<sub>2</sub>/tep<sup>29</sup>.
- **Levier (2) : L'efficacité énergétique** correspond à la quantité d'énergie nécessaire à un véhicule pour parcourir un kilomètre. Cette valeur varie pour chaque type véhicule du mode de transport considéré. Cette valeur est mesurée en tep/véhicule.kilomètre.
- **Levier (3) :** Le ratio entre la circulation de véhicules du mode de transport concerné (en véhicule.kilomètre) et le nombre de passagers (passager.kilomètre) de ce mode de transport. Ce ratio exprimé en véhicule/passager permet de représenter l'inverse du « **taux de remplissage** » d'un véhicule, qui est le nombre de voyageurs par véhicule.
- **Levier (4) :** La part de la demande du mode de transport i sur l'intégralité de la demande de transport est mesurée en pourcentage. Ce levier correspond à la notion de « **report modal** » : la demande totale de transport peut rester constante tout en observant la baisse d'un mode de transport (par exemple le maritime) au profit d'un autre (par exemple le routier).
- **Levier (5) :** La **demande** totale de transports correspond à la demande kilométrique de voyageurs et de marchandises, tous modes de transports confondus, exprimés en passager.km ou tonne.km.

Ces différents leviers de décarbonation du secteur du transport sont résumés dans la Figure 52.



Figure 52 : Les cinq leviers pour décarboner les transports, utilisés dans la décomposition des émissions de l'identité de Kaya[105]

A noter que dans cette partie, les leviers sont identifiés pour réduire les émissions de CO<sub>2</sub>, et non pour les compenser (voir Annexe 2). La compensation n'est donc pas un levier étudié dans la suite de cette étude (comme mentionné dans la définition du périmètre de l'étude en partie 1.3).

De cette analyse générique des leviers de décarbonation du secteur des transports découlent les cinq leviers de décarbonation du secteur aérien à savoir :

<sup>29</sup> Une Tonne Equivalent Pétrole (TEP) est une unité de mesure de l'énergie

1. La **baisse de l'intensité carbone** de l'énergie utilisée par les avions correspondant au levier (1) **Intensité carbone** de l'équation de Kaya appliquée aux transports. Cela se traduit par la modification des sources d'énergies consommées par les véhicules, constitué aujourd'hui quasi exclusivement de kérosène, via le recours aux Carburants d'Aviation Durables (CAD) (biocarburants d'aviation durables et électrocarburants), à l'hydrogène et à l'électricité. Ce levier est développé est partie 3.2 ;
2. L'augmentation de l'efficacité énergétique de l'aviation , correspondant au levier (2) **Efficacité énergétique** de l'équation de Kaya appliquée aux transports  
Ce levier peut être décomposé en deux leviers propres au secteur aérien : l'**augmentation de l'efficacité énergétique des flottes**, via une amélioration technologique permettant la baisse de l'énergie nécessaire pour réaliser un trajet donné (développé en partie 3.3.1) et l'**amélioration des opérations réalisées** en vol ou au sol (développé en partie 3.3.2) ;
3. L'**augmentation du taux de remplissage des avions**, correspondant au levier (3) **Taux de remplissage** de l'équation de Kaya appliquée aux transports. Ce levier est développé est partie 3.4 ;
4. Le **report modal** de l'aviation vers des modes de transports moins émetteurs (notamment le transport ferroviaire), correspondant au levier (4) **Report modal** de l'équation de Kaya appliquée aux transports  
Ce levier est développé est partie 3.5 ;
5. La **réduction et/ou la modération du trafic aérien**, correspondant au levier (5) **Demande de transport** de l'équation de Kaya appliquée aux transports. Ce levier est développé est partie 3.6.

Il convient de faire remarquer que ces cinq leviers ne sont pas rigoureusement indépendants (inconvenient connu de l'identité de Kaya).

## 3.2. La baisse de l'intensité carbone du mix énergétique

Les émissions de CO<sub>2</sub> du secteur aérien sont quasi-exclusivement liées à la consommation de kérosène par les avions, ainsi qu'aux émissions liées à la production et au transport de ce carburant. Le remplacement du kérosène par des sources d'énergies bas-carbone, ou ayant une empreinte carbone moindre, constitue un levier incontournable de décarbonation du secteur. Ce levier est en effet mobilisé dans quasiment tous les scénarios de prospective du secteur, puisque c'est le seul qui permet des réductions massives de ses émissions.

A titre de comparaison dans cette étude, le carburant « de référence » est le kérosène de type Jet A-1 car il est le plus répandu et présente des exigences de qualité déterminées au niveau international. A noter néanmoins que d'autres types de carburants sont aussi utilisés pour l'aviation : d'autres types de kérosène (Jet A, Jet B, JP-4, JP-5, JP-8...) mais aussi de l'essence aviation (AVGAS pour aviation gasoline).

Il existe aujourd'hui différentes énergies alternatives au kérosène, qui sont chacune associée à des enjeux et des limites [15] : les carburants aériens durables (qui regroupent les biocarburants d'aviation durables et les électrocarburants), mais aussi l'hydrogène et l'hybridation avec l'électricité bas-carbone.

### 3.2.1. Les Carburants Aériens Durables

Il existe quatre catégories de carburants alternatifs au kérosène présentant des caractéristiques similaires au kérosène : les biocarburants issus de biomasse répartis eux-mêmes en trois générations, et les électrocarburants.

- **La première génération de biocarburants** est issue de la valorisation de cultures spécifiques (huile de palme, canne à sucre, maïs...). Néanmoins il a été prouvé que ces biocarburants encouragent les changements d'utilisation des terres (notamment la déforestation), et ne permettent donc pas des réductions importantes d'émissions sur l'ensemble de leur cycle de vie. Par ailleurs, ils entrent en concurrence avec les cultures destinées aux besoins alimentaires ;
- **La seconde génération de biocarburants** est issue de cultures énergétiques dédiées ou de l'économie circulaire via le recyclage d'huiles usagées, de graisses traitées ainsi que la valorisation des déchets et résidus agricoles et forestiers. Les biocarburants de deuxième génération permettraient d'économiser jusqu'à 90 % d'émissions de carbone sur l'ensemble de leur cycle de vie [158] ;
- **La troisième génération de biocarburants** concerne l'exploitation d'algues et de levures, elle est aujourd'hui très prospective et pas assez mature pour être considérée dans la suite de cette étude ;
- **Les électrocarburants**, aussi appelés carburants de synthèse ou Power-to-Liquid (PtL), sont produits à partir de CO<sub>2</sub> (éventuellement issus d'un procédé de captage et de stockage) et d'hydrogène (H<sub>2</sub>). Leur capacité de décarbonation effective du secteur aérien dépend cependant



grandement du caractère décarboné de l'énergie (notamment de l'électricité) utilisée lors de leur production (Partie 4.4.2.2) [15].

Au vu des caractéristiques environnementales et techniques de ces différentes catégories de carburants alternatifs, ne sont considérés comme « carburants aériens durables » (CAD) que les biocarburants de seconde et troisième génération, appelés « biocarburants d'aviation durables » et les électrocarburants (cf Tableau 8 pour plus de détail sur les émissions des différents biocarburants, à comparer avec la valeur de 8730 gCO<sub>2</sub>eq/MJ pour le Jet A-1 sur l'intégralité de son cycle de vie selon la base carbone de l'ADEME)

Tous ces carburants sont dits « drop-in » : ils peuvent être utilisés pour les avions actuels immédiatement et ne nécessitent pas ou peu d'évolutions sur les moteurs et les avions existants. Il existe aujourd'hui 5 filières certifiées de production de biocarburants d'aviation durables et dont les produits peuvent être incorporés jusqu'à 50 % au carburant d'origine fossile. Ce taux représente toutefois aujourd'hui une limite physique imposée par les moteurs actuels. En effet, certains composants du jet conventionnel permettent d'éviter les fuites de carburant en gonflant les joints des moteurs, composants non présents dans les CAD. [159]. L'ASTM International, organisme qui est en particulier en charge des critères de certification des carburants d'aviation à l'échelle mondiale, est actuellement en train de mener des études pour déterminer la faisabilité d'atteindre un taux de 100 % d'incorporation. D'autres filières de production sont par ailleurs en cours de développement ou de certification par l'ASTM [160].

Tableau 8 : Emissions du cycle de vie des différents biocarburants [161] <sup>30</sup>

Fuel Conversion Process	Region	Fuel Feedstock	Core LCA Value	ILUC LCA Value	LS <sub>r</sub> (gCO <sub>2</sub> e/MJ)
Fischer-Tropsch (FT)	Global	Agricultural residues	7.7	0.0	7.7
	Global	Forestry residues	8.3		8.3
	Global	Municipal solid waste (MSW), 0% non-biogenic carbon (NBC)	5.2		5.2
	Global	Municipal solid waste (MSW) (NBC given as a percentage of the non-biogenic carbon content)	NBC*170.5 + 5.2		NBC*170.5 + 5.2
	USA	Poplar (short-rotation woody crops)	12.2	-5.2	7.0
	USA	Miscanthus (herbaceous energy crops)	10.4	-32.9	-22.5
	EU	Miscanthus (herbaceous energy crops)	10.4	-22.0	-11.6
	USA	Switchgrass (herbaceous energy crops)	10.4	-3.8	6.6
Hydroprocessed esters and fatty acids (HEFA)	Global	Tallow	22.5	0.0	22.5
	Global	Used cooking oil	13.9		13.9
	Global	Palm fatty acid distillate	20.7		20.7
	Global	Corn oil (from dry mill ethanol plant)	17.2		17.2
	USA	Soybean oil	40.4	24.5	64.9
	Brazil	Soybean oil	40.4	27.0	67.4
	EU	Rapeseed oil	47.4	24.1	71.5
	Malaysia & Indonesia	Palm oil – closed pond	37.4	39.1	76.5
Alcohol (isobutanol) to jet (ATJ)	Global	Agricultural residues	29.3	0.0	29.3
	Global	Forestry residues	23.8		23.8
	Brazil	Sugarcane	24.0	7.3	31.3
	USA	Corn grain	55.8	22.1	77.9
	USA	Miscanthus (herbaceous energy crops)	43.4	-54.1	-10.7
	EU	Miscanthus (herbaceous energy crops)	43.4	-31.0	12.4
	USA	Switchgrass (herbaceous energy crops)	43.4	-14.5	28.9
Alcohol (ethanol) to jet (ATJ)	Brazil	Sugarcane	24.1	8.7	32.8
	USA	Corn grain	65.7	25.1	90.8
Synthesized iso-paraffins (SIP)	Brazil	Sugarcane	32.8	11.3	44.1
	EU	Sugar beet	32.4	20.2	52.6

<sup>30</sup> Les valeurs « Core LCA » correspondent aux émissions liées au cycle de vie du type de biocarburant considéré (depuis la production jusqu'à son utilisation). Ces émissions sont forcément positives. Les valeurs ILUC (induced land use change) correspondent aux émissions associées au changement d'utilisation des sols entre la culture utilisée pour la production du type biocarburant considéré et la culture précédente (selon 3 critères : i/ variations des stocks de carbone de la biomasse vivante et ii/ du sol et iii/ dette d'émissions équivalente aux émissions séquestrées auxquelles on renonce). Le changement peut donc être positif ou négatif en fonction de la transition effectuée. Les valeurs totales retenues, intitulées « LS<sub>r</sub> » sont la somme des valeurs « Core LCA » et « ILUC LCA Value ». Ce sont ces valeurs qui sont comparées à la valeur de 87 gCO<sub>2</sub>eq/MJ pour le Jet A-1 sur l'intégralité de son cycle de vie

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

Les CAD ne représentent aujourd’hui qu’une infime partie des carburants consommés par les avions. En effet, en 2019, les biocarburants d’aviation durables représentaient seulement 0,01 % de la consommation aérienne mondiale [162]. Depuis 2016, seulement un peu plus de 300 000 vols dans le monde ont utilisé ce type de CAD [163]. La production mondiale de biocarburants ne devrait s’élever qu’entre 1 à 3 milliards de litres d’ici 2025, soit 1 % des consommations de kérosène projetées à cette date [164].

Néanmoins, des unités de production industrielles de biocarburants d’aviation durables sont actuellement en cours de développement ou d’industrialisation dans le monde (Figure 53), et ces projets sont encouragés par les réglementations actuelles. En effet, le futur règlement européen ReFuelEU Aviation (actuellement en cours de discussion au sein des institutions européennes) vise à faciliter le développement des CAD [165] en fixant des trajectoires d’incorporation de CAD jusqu’en 2050 avec un sous-objectif spécifique aux carburants synthétiques (voir Tableau 16). 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 % du mix énergétique utilisé dans les avions en 2030. La « Feuille de route pour le développement de filières biocarburants aéronautiques en France » vise quant à elle une consommation d’au moins 2 % de biocarburants de deuxième génération en 2025 et 5 % en 2030 dans les vols au départ FranceFrance [166].

Il n’existe enfin à ce jour aucune installation industrielle de production d’électrocarburants. Le futur règlement européen ReFuelEU Aviation prévoit que la production de ce type de CAD deviendra significative à partir de 2030. A cette date, les électrocarburants devront représenter au moins 1 % des consommations de carburants des vols au départ de l’Union Européenne (voir Partie 4.4.2.3 pour plus de détails) [165].

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>Futurool (tous types de biomasse – en cours de commercialisation)</li> <li>BioTFuel (fin en 2021)</li> </ul>
Electrocarburant	CO2 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>

Figure 53 : Exemples de projets de production de CAD en cours dans le monde

### Une alternative néanmoins confrontée à plusieurs limites

Le développement des CAD est cependant confronté à plusieurs limites.

- La première d’entre elles est la **rareté des ressources disponibles** pour produire les biocarburants d’aviation durables, qui sont par nature limitées (car produits à partir de certains déchets et résidus de culture) et les **futurs conflits d’usage** avec d’autres secteurs : transport routier, bâtiment, industrie, bioéconomie... [15][158].
- **La production d’électrocarburants est énergivore.** L’énergie électrique nécessaire pour produire 1kWh d’énergie sous forme d’électrocarburants (compression, captage de CO<sub>2</sub>, synthèse, transport, stockage et distribution) s’élève entre 2,8 et 4,6 kWh selon que le CO<sub>2</sub> est capté à la sortie des usines ou directement dans l’air [167]. Pour produire 4Mt d’électrocarburants (soit environ 50 % de la consommation de kérosène des vols domestiques et internationaux en France en 2019[123]) à partir d’électricité issue d’éolienne, il faudrait multiplier le parc éolien français par 5 [15]. Produire suffisamment d’électrocarburants (et d’hydrogène) pour satisfaire 100 % de la demande européenne de carburants en 2050 (en comptabilisant que 11,4 % de la demande est couverte par les biocarburants) conduirait à consommer 28 % de la production électrique européenne de 2015 [168].
- Par ailleurs, le **prix** des biocarburants est environ quatre fois plus cher aujourd’hui que le kérosène conventionnel, les électrocarburants étant encore plus chers<sup>31</sup> et pourrait encore être deux fois plus élevé que celui des carburants d’origine fossile en 2050.
- **Il n’est aujourd’hui pas possible techniquement de faire voler les avions actuels avec 100 % de CAD.** En effet, ceux-ci ne comportent pas certains composants des carburants fossiles (par

<sup>31</sup> Les électrocarburants étaient presque 7 fois plus chers que le kérosène avant la guerre en Ukraine. A l’horizon 2030 (année de début de commercialisation), il est estimé qu’ils pourraient être 5 fois plus chers que le kérosène [167].

exemple des composés soufrés ou aromatiques), ce qui a un impact négatif sur les systèmes de distribution des carburants présents aujourd'hui dans les avions.

- Enfin, il n'existe aujourd'hui **pas de filière structurée de production** de CAD en France, qui ne dispose que d'une usine qui en produit à partir d'huiles usagées selon la technologie HEFA<sup>32</sup>. Cette usine, qui est située à Grandpuits (Seine-et-Marne) et qui appartient à TotalEnergies, a une capacité de production de 170 000 tonnes de biocarburants par an [160].

### 3.2.2. L'hydrogène bas-carbone

L'hydrogène possède un avantage majeur : sa combustion et son utilisation (notamment avec des piles à combustible) ne rejettent quasiment<sup>33</sup> que de l'eau.

Cependant, l'hydrogène est actuellement produit à 95 % à partir d'énergies fossiles (par reformage du gaz naturel à vapeur d'eau ou par gazéification). Ce mode de production est très intensif en carbone. Substituer de l'hydrogène produit par cette méthode à du kérosène ne constitue pas un levier de décarbonation.

La technique la plus vertueuse du point de vue climatique pour produire de l'hydrogène bas-carbone est aujourd'hui **l'électrolyse de l'eau** (une réaction utilisant de l'eau et de l'électricité). Ce mode de production de l'hydrogène est énergivore. Il faut 1,7 kWh d'électricité pour produire 1 kWh d'hydrogène [15]. Le caractère bas-carbone de l'hydrogène produit par électrolyse est donc conditionné par le **contenu carbone de l'électricité utilisée** [170][169]. Pour que l'hydrogène produit soit moins intense en carbone que le kérosène aujourd'hui consommé par les avions, l'électricité utilisée lors de l'électrolyse doit être associée à une intensité carbone inférieure à 180 gCO<sub>2</sub>eq/kWh<sup>34</sup>. Cela implique que pour être bas-carbone, l'électricité utilisée doit être d'origine nucléaire ou renouvelable [107] [172].

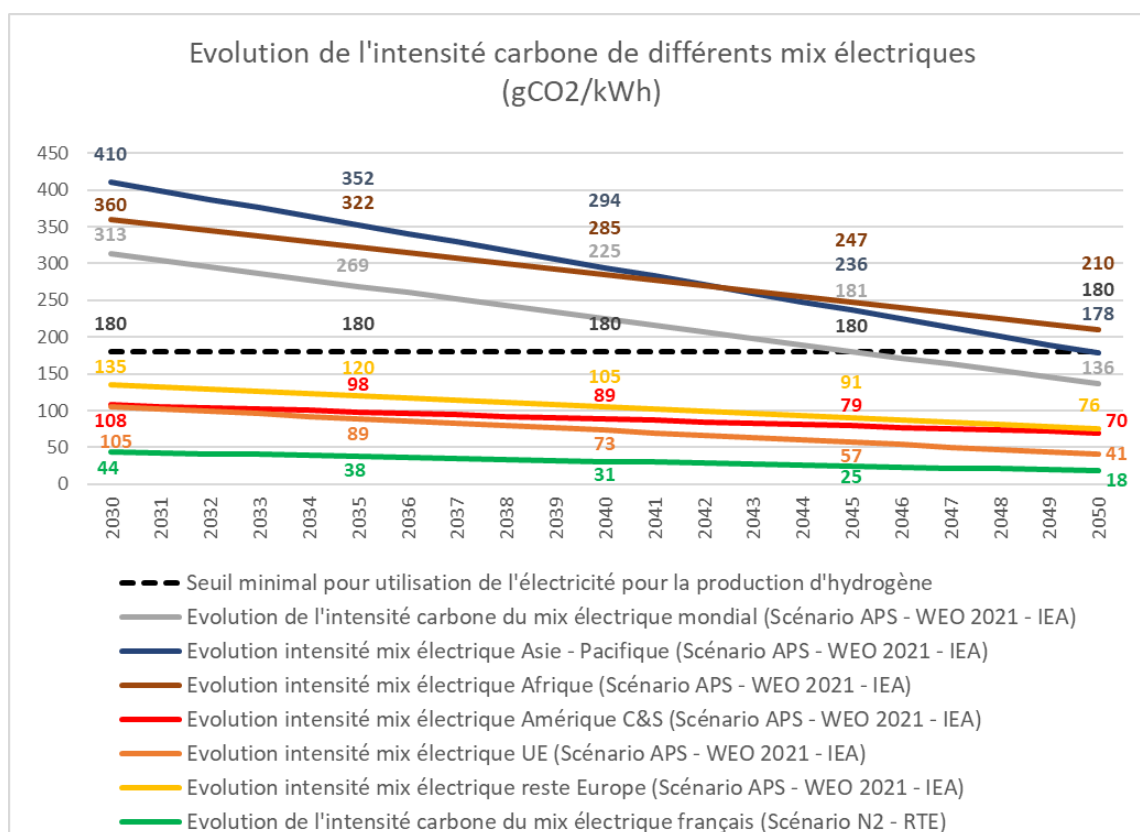


Figure 54 : Evolution de l'intensité du mix électriques des différentes régions du monde basé sur le scénario WEO - APS de l'IEA

<sup>32</sup> La technologie HEFA (Hydroprocessed Esters and Fatty Acids) est une des technologies certifiées pour la production de biocarburants d'aviation durables. Il en existe d'autres, notamment la technologie FT (Fischer-Tropsch).

<sup>33</sup> La combustion d'hydrogène émet en effet des NO<sub>x</sub>, ce qui n'est pas le cas lors de l'utilisation de piles à combustibles [169]

<sup>34</sup> Pour comparaison, l'intensité carbone moyenne du mix électrique asiatique était de 550 gCO<sub>2</sub>eq/kWh en 2019, celle du mix africain de 503 gCO<sub>2</sub>eq/kWh, celle du mix nord-américain de 366 gCO<sub>2</sub>eq/kWh, celle du mix européen de 292 gCO<sub>2</sub>eq/kWh, celle du mix sud-américain de 183 gCO<sub>2</sub>eq/kWh [171].

En outre, l'impact climatique de la combustion d'hydrogène (combustion et pile à combustible) n'est pas uniquement lié au rejet de CO<sub>2</sub> (Parties 2.3.2.3 et 5.2.2.3.1), il s'agit de regarder aussi les effets hors CO<sub>2</sub> de l'utilisation d'hydrogène. En effet, si les émissions de NO<sub>x</sub> sont limitées avec cette technologie par rapport à la combustion de kérosène, les émissions de vapeur d'eau sont supérieures que dans le cas de kérosène. Finalement, les effets de l'utilisation d'hydrogène sur la création de nuages induits ne sont pas encore bien maîtrisés. Les impacts sont a priori annoncés inférieurs à la combustion de kérosène avec un impact supérieur dans le cas de combustion de l'hydrogène (-30 à -50 %) par rapport à l'utilisation de piles à combustibles (-60 à -80 %) [169]. Les connaissances scientifiques sur ce sujet sont aujourd'hui incomplètes, et il faudra attendre la sortie des premiers prototypes d'avions entre 2026 et 2028 pour connaître le bilan climatique complet et réel de la substitution du kérosène par de l'hydrogène.

Par ailleurs, cette énergie ne pourra être utilisée que pour des avions régionaux, court-courriers ou moyen-courriers, puisqu'il est nécessaire d'embarquer un volume d'hydrogène au moins 4 fois supérieur à celui du kérosène pour assurer le même vol (du fait de la plus faible masse volumique de l'hydrogène liquide par rapport au kérosène).

L'utilisation d'hydrogène est enfin confrontée à des enjeux de sécurité (sécurisation des circuits d'hydrogène sous pression à haute altitude, difficulté de certification au vu du niveau d'explosivité de l'hydrogène...) et de faisabilité technique (l'hydrogène devant être stocké à -253°C sous forme liquide dans les avions) qui imposent de transporter des réservoirs de masse à vide importante, et de repenser entièrement les configurations des avions actuels, ainsi que d'adapter des infrastructures aéroportuaires et de disposer d'une filière nationale de production et d'approvisionnement d'hydrogène bas-carbone (Partie 3.3.1.2)

### 3.2.3. L'hybridation avec de l'électricité bas-carbone

Le développement d'avions commerciaux de grande capacité court, moyen et long-courrier à propulsion électrique est jugé impossible (Partie 3.3.1.2). Néanmoins il est envisageable d'électrifier une partie du vol, notamment les phases de montée et de descente. Il est estimé qu'une hybridation des avions sera possible dans cinq ans pour les avions de tourisme ou d'affaires très courts courriers (ou « commuters ») avec un maximum de 10 passagers [173].

## 3.3. L'amélioration de l'efficacité énergétique des flottes aériennes

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

- Les différentes améliorations sont tout d'abord identifiées dans des organismes de Recherche & Développement ;
- Des tests sont ensuite réalisés sur des prototypes afin de vérifier l'augmentation effective de l'efficacité énergétique de l'avion ;
- Ces améliorations validées, elles sont intégrées aux nouveaux avions construits avec une part de pénétration initialement faible dans la flotte existante ;
- La flotte est graduellement renouvelée pour intégrer une plus grande part d'avions avec une meilleure performance énergétique dans la flotte totale.

L'efficacité énergétique des flottes aériennes s'améliore donc progressivement grâce à la modernisation des appareils qui les composent. Cette amélioration peut aussi provenir de l'optimisation des opérations réalisées en vol ou au sol, ce qui permet des économies de carburant sur la phase d'utilisation des avions sans modification structurelle des flottes.

### 3.3.1. Le développement de nouveaux avions

#### 3.3.1.1. Le développement de nouveaux avions à kérosène plus performants

Afin d'améliorer l'efficacité technologique des avions, plusieurs leviers peuvent être activés. Les ateliers de consultation des parties prenantes du secteur (Partie 0) ont permis d'identifier les différentes catégories de leviers détaillées ci-dessous.

Tout d'abord, l'efficacité énergétique des avions peut être améliorée via une amélioration **de l'efficacité de leurs moteurs** [15].

- Il existe deux grands types de moteurs utilisés en aéronautique qui diffèrent selon leur système de propulsion : les **turboréacteurs** (lorsque la pression disponible est exploitée directement grâce à une détente réalisée dans la tuyère) et les **turbopropulseurs** (variante du turboréacteur auquel une turbine à hélices est ajoutée à l'avant du moteur, la pression est donc exploitée indirectement). Les turbopropulseurs ont une vitesse optimale de fonctionnement plus basse que



les turboréacteurs pour une capacité similaire et une même génération de moteur. Cela se traduit par une plus faible consommation d'énergie (donc moins d'émissions associées) mais aussi une augmentation du temps de trajet. Cette dernière reste négligeable pour les vols de moins d'une heure et demi (donc pour les vols court-courriers). Concernant les vols intérieurs de petite capacité (par exemple pour les modèles de moins de 105 places disponibles tels que les CRJ<sup>35</sup>700 et 1000, les Embraer 135, 145 et 170 et les ATR<sup>36</sup> 72 ou 47) il serait donc possible de remplacer les turboréacteurs par des turbopropulseurs. Cela impliquerait une diminution des émissions de l'ordre de 40-45 %, selon le rapport « Pouvoir Voler en 2050 » [15]. Par ailleurs, l'utilisation de turbopropulseurs permet de diminuer les effets climatiques hors CO<sub>2</sub> (Partie 5.2.2.3.1).

- **L'efficacité thermique** d'un moteur est le premier indicateur pour mesurer la qualité thermodynamique de celui-ci. Elle consiste en la mesure du rapport entre l'énergie cinétique apportée au fluide lors de la réaction de combustion (l'énergie utile récupérée) et l'énergie thermique produite par la combustion (énergie apportée au système)<sup>37</sup>. Des leviers existent pour améliorer l'efficacité thermique grâce à l'amélioration technologique des chambres de combustion (comme c'est notamment le cas du moteur LEAP<sup>38</sup>);
- Un deuxième type d'indicateur de mesure de la qualité thermodynamique d'un moteur est **l'efficacité propulsive** qui mesure le rapport entre le travail mécanique disponible en sortie de réaction et l'énergie cinétique apportée par le fluide lors de la réaction de combustion.[98] Des pistes d'amélioration de cette efficacité propulsive existent, notamment avec une augmentation du taux de dilution<sup>39</sup>. Une des technologies aujourd'hui prometteuses dans ce domaine est la technologie Open Rotor développée par Safran qui apporterait un gain de 15% d'efficacité des moteurs alliant une amélioration des rendements thermiques et propulsifs[15]. Néanmoins cette technologie comporte un certain nombre d'inconvénients inhérents à toute rupture technologique. Son déploiement rapide à grande échelle n'est donc pas garanti.
- Indépendamment de ces améliorations de l'efficacité des moteurs, la recherche s'oriente aujourd'hui vers le développement de moteurs permettant **une incorporation de carburants alternatifs durables plus élevée** (avec comme objectif 100 % de taux d'incorporation). En effet, au vu des moteurs actuels et des certifications existantes de carburants d'aviation durables, il n'est pas possible d'incorporer plus d'un certain montant de biocarburant (dépendant des certifications et pouvant atteindre un taux de 50 %). Ceci est dû à une mauvaise compatibilité des joints du moteur lorsque moins d'aromatiques sont présents dans le carburant (c'est notamment le cas avec les processus actuels de synthèse des carburants d'aviation durables) (Partie 3.2.1).

Un deuxième levier d'amélioration de l'efficacité énergétique des avions est celui de **l'optimisation de l'écoulement de l'air autour des appareils** afin de diminuer les pertes énergétiques associées. Pour cela plusieurs leviers existent et comportent leurs lots d'avantages et inconvénients. Parmi eux, l'application de la laminarité naturelle aux ailes à la place de la laminarité contrôlée permettrait des réductions de 4 à 5 % de consommation mais induirait une diminution forte de la vitesse [15].

Le troisième levier est **l'optimisation des formes des avions**, notamment via l'optimisation des profils géométriques et d'autres innovations permettant de réduire les traînées de bout d'aile et de frottement. Des pistes de réflexion existent aussi sur la pertinence de l'intégration des trains principaux et/ou des motrices dans le fuselage.

Il est aussi possible d'améliorer l'efficacité énergétique des avions en **diminuant leur masse**, ce qui est directement corrélé à une diminution de consommation de carburant. Pour cela il est possible d'utiliser des matériaux composites, plus légers, pour les pièces complexes et notamment les trains d'atterrissage ; d'utiliser des matériaux thermoplastiques permettant une réduction des pièces élémentaires et de fixation ; ou encore d'utiliser la fibre optique et des techniques de multiplexages associées pour remplacer les centaines de kilomètres de câbles électriques existants, ce qui permettrait jusqu'à 30 % de diminution de la masse selon les constructeurs.

<sup>35</sup> Canadair Regional Jet (CRJ) est un avion de transport régional conçu par l'avionneur canadien Bombardier Aéronautique.

<sup>36</sup> Avions de Transport Régional (ATR) est un constructeur aéronautique Français.

<sup>37</sup> Une partie de l'énergie est en effet « perdue » par le réchauffement des gaz d'éjection

<sup>38</sup> Le moteur Leading Edge Aviation Propulsion (LEAP) est une génération de turboréacteurs conçue par Safran Aircraft Engines et General Electric

<sup>39</sup> Le taux de dilution est le rapport entre la masse d'air du flux froid arrivant dans un réacteur et celle du flux chaud repartant de celui-ci. Par exemple, dans un turboréacteur à double flux, le flux « chaud » est tout simplement celui qui contient les gaz issus de la combustion du mélange air/carburant, qui se produit dans la partie souvent désignée « cœur » du moteur. Le flux « froid » est celui issu du canal secondaire du moteur, qui contourne le cœur du moteur et ne subit aucune combustion [174].



Un autre levier est **d'optimiser la gestion globale de l'énergie embarquée**. Ainsi il est possible de diminuer la consommation de carburant embarqué notamment en électrifiant des systèmes de taxiage<sup>40</sup> aujourd'hui réalisés via l'utilisation des APU<sup>41</sup>. Il est donc possible d'éviter l'utilisation des moteurs au sol. De même, l'électrification des systèmes de conditionnement d'air et de dégivrage permettrait de supprimer les prélèvements d'air sur les moteurs des avions. Enfin, l'apport d'une assistance électrique aux moteurs permettrait d'utiliser autant que possible les moteurs à leur point de fonctionnement optimal. Néanmoins toutes ces électrifications nécessitent l'introduction de nouvelles sources d'énergie et la définition de nouvelles architectures de réseaux électriques à haute tension. D'autres leviers concernant le taxiage sont abordés dans la partie 3.3.2.2 en ce qui concerne les opérations au sol.

Finalement il est possible de modifier la forme des avions afin de développer des **nouvelles architectures d'aéronefs** plus efficaces. De nombreuses disruptions technologiques sont imaginées et pourraient permettre des gains énergétiques conséquents : ailes volantes, propulsion répartie, disparition des cockpits... Néanmoins ces projets sont aujourd'hui prospectifs et ne devraient pas apparaître avant plusieurs décennies, les gains énergétiques associées étant par ailleurs difficilement quantifiables.

### **Rétrospective des améliorations historiques de l'efficacité énergétique des avions**

Les appareils sont aujourd'hui 85% plus efficaces du point de vue énergétique que dans les années 1960. Les émissions de CO<sub>2</sub> par passager-kilomètre ont donc évolué à la baisse pendant que le trafic augmentait (Figure 55). La raison principale de cette évolution 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).

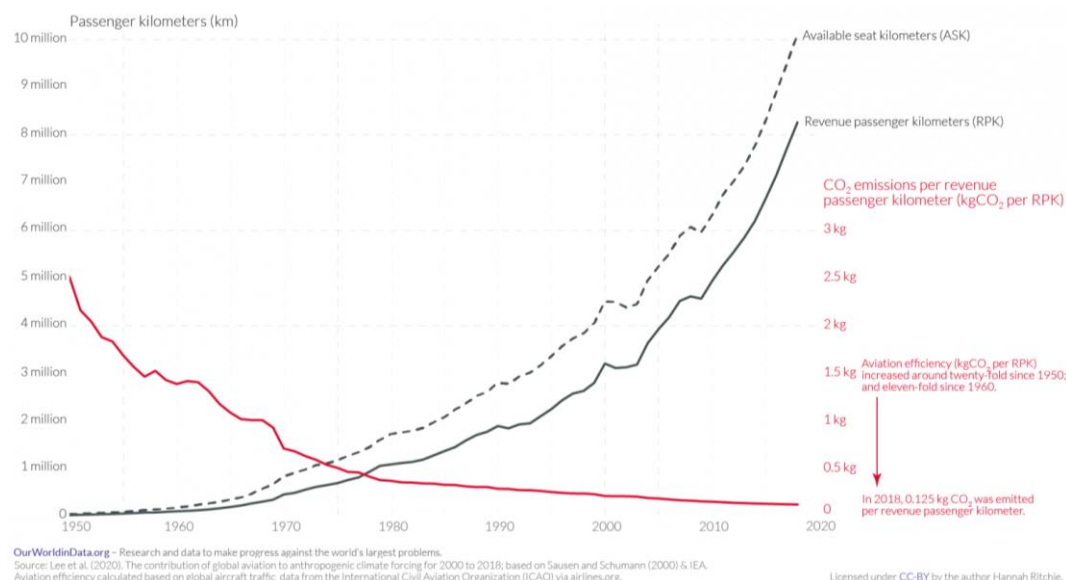


Figure 55 : Evolution du trafic aérien mondial (en noir) et des émissions par passagers-kilomètres payants (en rouge) [175]

### **Une amélioration de l'efficacité énergétique qui se poursuivra jusqu'en 2050**

Selon une étude de l'International Coalition for Sustainable Aviation (ICSA) [176], une amélioration de l'efficacité énergétique des avions de +2,5 % par an jusqu'en 2050 est nécessaire pour respecter les Accords de Paris. 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. Néanmoins de nombreux dissensus existent sur cette valeur selon les différents acteurs [21].

Selon le GIFAS (Groupement des Industries Françaises Aéronautiques et Spatiales), la nouvelle génération d'avions aura par ailleurs un gain de consommation d'énergie de 20 % à 30 % par rapport à la génération actuelle, gain qui doit être moyenné par la durée de renouvellement des flottes (en moyenne de 25 ans aujourd'hui – Partie 5.1.1.3)

La plupart des études jugent plus probable une amélioration de l'efficacité énergétique des appareils d'environ +1 % par an jusqu'en 2050. En effet, les progrès en termes d'efficacité énergétique des appareils

<sup>40</sup> C'est à-dire les systèmes permettant aux avions de se déplacer au sol.

<sup>41</sup> Groupe auxiliaire de puissance (Auxiliary Power Unit)

atteignent une asymptote [15], et il devient de plus en plus difficile et coûteux de générer de tels progrès [168].

La Figure 56 compare ainsi les différentes estimations d'amélioration de l'efficacité énergétique selon les acteurs.

	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
Zero 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

Figure 56 : Comparaison des estimations d'amélioration de l'efficacité énergétique de l'aviation selon différents acteurs

### 3.3.1.2. Les avions à propulsion hydrogène et électrique plus efficaces

Comme mentionné en Partie 3.2, certains carburants alternatifs au Jet-A1 avec une plus faible intensité carbone ne peuvent pas être incorporés directement dans les avions actuels (ils ne sont pas « drop-in »), et nécessitent donc le développement de nouvelles architectures d'avion. C'est notamment le cas pour l'hydrogène et l'électricité.

#### **L'avion à hydrogène d'ici 2035 pour des vols court ou moyen-courriers impose des contraintes techniques importantes**

L'hydrogène peut être utilisé de deux façons différentes dans les avions : soit via une combustion directe dans un moteur à combustion, soit via la génération d'électricité dans une pile à combustible. Le choix de la technologie qui sera employée est aujourd'hui inconnu. Le secteur français de la construction aéronautique, notamment Airbus, travaille actuellement sur le développement d'avions à propulsion à hydrogène et est actuellement confronté à plusieurs contraintes techniques (Partie 3.2.2). Il est soutenu dans cette tâche par le Plan de soutien à l'aéronautique de 1,5 Mds € consacré à la Recherche et Développement aéronautique en 2020 suite à la crise du Covid, qui inclut comme objectif la commercialisation d'un avion « vert à hydrogène » d'ici 2035 [80]. Airbus a présenté trois prototypes d'avion à propulsion hydrogène en 2020 dont un de ces modèles est disruptif et réinvente le profil actuel des aéronefs [177].

Néanmoins, 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 (Partie 5).

#### **L'électrification des avions, une piste possible pour assurer les très courtes liaisons aériennes**

Comme mentionné en Partie 3.2.3, le développement d'avions commerciaux à propulsion électrique est jugé impossible du fait de la masse trop importante des batteries qu'il serait nécessaire d'embarquer dans ces appareils si ceux-ci étaient entièrement électriques. En effet, les batteries électriques actuelles ont une densité énergétique par unité de masse beaucoup plus faible que le kérosène. L'industrie aéronautique étudie aujourd'hui la piste d'avions hybrides (carburant/ batteries électriques) pour les très courtes liaisons (« commuturs ») ou les liaisons régionales [15]. L'hybridation consisterait surtout en une électrification des phases de montée et de descente.

### 3.3.1.3. Renouvellement des flottes

Lorsque de nouveaux modèles d'avions plus performants énergétiquement parlant sont commercialisés, l'amélioration de l'efficacité énergétique des flottes aériennes dépend du taux de pénétration de ces nouveaux avions dans les flottes existantes, et donc de leur rapidité de renouvellement. La pertinence écologique du renouvellement des flottes est principalement appuyée par le fait que les émissions liées à la fabrication d'un avion représentent moins de 2 % des émissions du cycle de vie total d'un avion<sup>42</sup> (Partie 2.3.1.1).

Aujourd'hui selon l'OACI, la flotte mondiale est renouvelée tous les 25 ans. Néanmoins, de fortes disparités existent selon différents critères :

- **La localisation géographique des compagnies aériennes** : les compagnies occidentales se séparent plus vite de leur flotte que la moyenne et revendent leurs plus vieux avions à d'autres compagnies aériennes, notamment dans les pays en voie de développement. L'âge moyen des avions des flottes de compagnies européennes est de l'ordre de 11 ans (12 ans pour Air France KLM au 30 décembre 2020 [178]), celui des avions des flottes des compagnies du Golfe et des compagnies asiatiques de l'ordre de 6 ans [15] ;
- **La taille des compagnies** : les flottes les plus anciennes concernent les plus petites compagnies aériennes ;
- **Le modèle d'affaires des compagnies** : la flotte des compagnies à bas-coût (« low-cost ») avait un âge moyen très faible jusqu'en 2010 car les compagnies revendaient les appareils lorsqu'ils atteignaient l'âge de 8 ans. Cependant, l'âge moyen des flottes de ces compagnies a augmenté depuis, suite à l'augmentation de leurs parts de marchés et donc à l'augmentation de la taille de leurs flottes [15].

### 3.3.2. L'amélioration des opérations en vol et au sol

Les opérations au sol et en vol peuvent être optimisées, ce qui peut entraîner une réduction des émissions actuelles de CO<sub>2</sub> du secteur. Ce levier pourrait permettre un gain de maximum 6% des émissions en 2050 (par rapport à un scénario de référence sans amélioration des émissions) (Figure 57).

	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

Figure 57 : Comparaison des estimations de l'amélioration d'efficacité énergétique liées à l'amélioration des opérations selon différents acteurs

#### 3.3.2.1. Opérations en vol

L'optimisation des opérations en vol s'appuie sur différents leviers de gestion du trafic aérien ou Air Traffic Management (ATM) :

- **L'optimisation des routes et des trajectoires**. Pour cela différentes pistes de réflexion existent : le vol en formation, l'éco-pilotage (descentes continues, free routes, relèvement des altitudes d'arrivée...);
- **L'optimisation des plans et paramètres de vol**. En effet, il est possible d'ajuster la vitesse et l'altitude de vol afin de minimiser la consommation du carburant. En revanche, cela se traduit par une augmentation relative du temps de trajet. Cet arbitrage est modélisé dans la valeur du « Cost Index »[15] ;
- **La limitation du « fuel tankering »** qui est une pratique consistant à embarquer plus de carburant que nécessaire pour un vol afin d'éviter ou de limiter le ravitaillement à l'aéroport d'arrivée

<sup>42</sup> Pour rappel, le périmètre de l'étude n'inclut pas les impacts sur les ressources minières qui sont directement impactées par l'augmentation de la production d'avions.

(lorsque le carburant y est plus cher). Le surpoids correspondant augmente donc la consommation de carburant ;

- **L'optimisation de la configuration des volets de l'avion au décollage** [173].

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 en maintenant la gestion du trafic telle qu'elle est actuellement réalisée.

La meilleure piste d'amélioration des opérations en vol repose aujourd'hui sur **l'initiative « Single European Sky »**. Aujourd'hui, le ciel Européen est géré par une mosaïque de 9 centres de gestion de trafic ce qui implique un allongement des routes et une discontinuité des trajectoires. L'objectif du « Single European Sky » est l'établissement de règles communes et d'une coopération entre les centres de contrôle pour créer un espace aérien commun. Cela permettra de fluidifier le trafic, de réduire les temps de parcours et de réaliser des économies 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, faire baisser les émissions actuelles de GES de l'ordre de 10 % en 2050 selon le secteur [179].

### 3.3.2.2. Opérations au sol

En parallèle de l'optimisation des opérations en vol, il est possible d'améliorer les opérations au sol, à savoir tout ce qui concerne l'avion et son environnement avant le décollage ou après l'atterrissage. Pour cela, différents axes d'amélioration existent et concernent principalement les aéroports et les compagnies aériennes :

- **La limitation du temps de roulage** via une modification de l'architecture des aéroports : optimisation des emplacements des portes d'embarquement, de la gestion des flux (via un processus appelé Collaborative Decision Making - CDM<sup>43</sup>), aménagement de bretelles de dégagements par exemple [124] ;
- **La limitation du temps d'attente sur les pistes** avant décollage (notamment via les mêmes procédés que mentionnés précédemment ;
- **La limitation des émissions lors du roulage de l'avion**. Un levier consiste à limiter l'utilisation des Groupes Auxiliaires de Puissance (APU en anglais) qui génèrent de l'énergie à bord lorsque les moteurs principaux sont éteints. Pour cela il est possible de substituer les APU par des groupes électriques pour le chauffage et par des climatisations électriques<sup>44</sup>. Il est aussi possible de limiter les émissions lors du roulage grâce à l'utilisation d'un seul moteur lors des phases de roulage (techniques dites de Single Engine Taxi-In (SETI) pour la phase de roulage après atterrissage et de Single Engine Taxi-Out (SETO) pour la phase avant décollage). Il est aussi envisageable d'électrifier intégralement le roulage de l'avion via un système appelé Electric Green Taxiing System (EGTS) qui consiste en l'intégration d'un moteur électrique alimenté par l'APU dans chaque train d'atterrissage [124]. Il est enfin possible de tracter les avions via une source externe, c'est le cas du Système de Traction des Avions au Roulage (STAR) qui consiste à utiliser un TaxiBot pour le roulage, Taxibot qui est commandé depuis le cockpit ;
- **La décarbonation des matériels de soutien au sol** pour entretenir l'avion entre les vols (Ground Support Equipment - GSE). Pour cela, il est envisagé de remplacer ces véhicules et engins de pistes par des appareils électriques, hybrides ou à hydrogène et d'encourager l'écoconduite notamment.

## 3.4. L'augmentation du taux de remplissage

Le taux de remplissage d'un vol est calculé en divisant le nombre de passagers réellement embarqués par le nombre de sièges disponibles. Le remplissage des avions au départ et à l'arrivée de la France est aujourd'hui déjà largement optimisé, et ceux-ci comportent en moyenne peu de sièges vides. Ainsi, les vols intérieurs étaient en moyenne remplis à 85 % en 2019 pour la France [75], et il est estimé dans les scénarios que cette valeur était de 82 % à la même période pour les vols internationaux. Une augmentation de ces taux permettrait de réduire la quantité d'émission par passager.

<sup>43</sup> Le concept Européen de CDM a pour objectif d'optimiser les flux de trafic aérien et le fonctionnement des aéroports grâce à une meilleure coordination entre les différents acteurs (meilleur partage d'information en temps réel pour aider à la prise de décision et à l'optimisation des ressources). La mise en place opérationnelle des concepts CDM sur l'aéroport de Paris Charles de Gaulle aurait permis de réduire de 10% les temps de roulage. 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 congestion est limitée [180]. Par conséquent, le nombre d'aéroports français sur lesquelles un tel processus peut encore être mis en place est aujourd'hui très limité, et les gains d'émissions associés à ce levier sont faibles.

<sup>44</sup> Il s'agit par exemple d'une des mesures proposées au niveau européen pour accélérer l'électrification des aéroports (projet de règlement européen sur le déploiement d'une infrastructure pour carburants alternatifs - AFIR).



A noter que la **densification des cabines**, c'est-à-dire l'augmentation du nombre de sièges par avion, est également un levier de décarbonation du secteur<sup>45</sup>. Pour cela, une piste d'action consiste à diminuer le nombre de places en classe Affaires et/ou Première pour augmenter le nombre de places en classe économique. En effet un siège Affaires (resp. Première) occupe la surface d'environ trois (resp. six) sièges économiques [15], ce qui constitue un gisement important de nouveaux sièges et donc de passagers par avion.

### **3.5. Le report modal vers des modes de transports moins émetteurs et le développement de l'intermodalité**

#### **3.5.1. Le report modal de l'avion vers le train, un levier de baisse des émissions**

Afin de baisser l'impact climatique d'un voyage, un des leviers possibles est de réaliser ledit voyage via un mode de transport avec un moindre impact climatique que l'avion.

En effet, l'avion est, avec la voiture, la solution de transport de personnes la plus émettrice de GES en France, en moyenne (Partie 2.4.2). Le train est au contraire une solution de transport beaucoup moins carbonée.

Choisir de réaliser un voyage en train plutôt qu'en avion (phénomène de report modal du train vers l'avion) permet donc de diminuer les émissions liées à celui-ci. Le train est justement une solution de transport qui permet parfois de se déplacer plus rapidement que l'avion lorsque l'on mesure le temps de voyage de porte à porte [181]. Le train n'est néanmoins une alternative généralement retenue que pour les trajets de moins de 800 km pour les trains de jour et de moins de 1500 km pour les trains de nuit.

#### **3.5.2. Facteurs contribuant aux report modal du train vers l'avion**

##### **La réouverture d'anciennes lignes et l'augmentation de la fréquence des trains sur les lignes existantes**

Les trains de nuit ont quasiment disparu en France depuis 1981 (Figure 58). La réouverture de nouvelles lignes de train de nuit constitue ainsi un levier de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> du secteur aérien.



Figure 58 : Evolution de la desserte en train de nuit en France entre 1980 et aujourd'hui [182]

De la même manière, l'augmentation de la fréquence des trains sur les lignes existantes peut conduire à la substitution de certains trajets en avion par des trajets en train.

##### **La construction de nouvelles Lignes de train à Grande Vitesse (LGV), une mesure permettant du report modal mais dont le bilan climatique est plus controversé**

Il est ainsi observé que lorsqu'une nouvelle LGV est créée, un report modal se fait depuis l'avion et la route vers le train. Un tel report modal a été observé lors de l'ouverture de la LGV Paris-Bordeaux mentionnée en Partie 2.4, mais aussi pour celui de la LGV Berlin-Munich comme illustré ci-dessous (Figure 59).

<sup>45</sup> Ce levier est plus précisément un levier d'augmentation de la capacité d'emport des avions (et non un levier d'augmentation des taux de remplissage).





Figure 59 : 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 [183]

Il existe néanmoins des débats sur l'intérêt climatique (et environnemental) de construire de nouvelles LGV. En effet, leur création nécessite la construction de nombreuses infrastructures, dont le coût environnemental est très important. Sous certaines conditions, il semblerait néanmoins que la construction de nouvelle LGV pourrait avoir un bilan climatique positif au bout d'un certain temps si elle conduit à du report modal de la voiture et de l'avion vers le train (voir par exemple [109]).

### **Une tendance de fond renforcée depuis la pandémie : le report modal vers le train pour des raisons environnementales**

Dès 2014, 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 selon la DGAC [184].

Différentes études sorties récemment confirment cette volonté de report modal vers le train pour des raisons environnementales. C'est notamment le cas d'une étude « By train or by plane ? Traveller's dilemma after Covid-19 » publiée par l'UBS Investment Bank en 2020 [185] qui 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.

La loi « Climat et Résilience » [119], qui interdit sous conditions les liaisons intérieures pour lesquelles il existe une alternative ferroviaire d'une durée de moins de 2h30, contribue également à cette tendance.

### **3.5.3. Le développement de l'intermodalité**

Sans totalement remplacer un moyen de transport par un autre, il est possible de développer l'intermodalité, c'est-à-dire la combinaison de différents modes de transport lors des voyages, afin de faire baisser l'impact carbone des trajets concernés.

Aujourd'hui en France par exemple, malgré une légère hausse de l'utilisation du transport ferroviaire ces dernières années, la majorité (66 %) du transport jusqu'aux aéroports se fait en voiture, 5 % en train et 23 % en transport en commun. Les chiffres sont similaires pour le moyen de transport utilisé pour rejoindre la destination finale, avec une place accrue de la voiture si la destination se trouve en dehors de la ville d'arrivée mais à moins de 200 km de celle-ci [53].

Le développement de l'intermodalité train-avion mais aussi des dessertes des aéroports en transports en commun peut donc contribuer à diminuer les émissions de GES liées à ces trajets et donc aux voyages en avion. Pour pouvoir réellement contribuer à faire baisser les émissions, le développement de l'intermodalité train-avion ne doit néanmoins pas générer d'effets de fuite (Partie 2.4.3) ou d'effets rebonds (Partie 2.4.4), et doit donc conduire à la substitution partielle des trajets en avion (ou en voiture pour les accès vers et depuis les aéroports) par des trajets en train.

Les freins au développement de l'intermodalité train-avion sont développés Partie 2.4.4.

## **3.6. La réduction ou la modération du trafic**

Finalement, le dernier levier du secteur et le dernier terme de l'équation de Kaya consiste à réduire (de manière absolue) le niveau de trafic aérien (en termes de PKTeq), ou à le modérer (c'est-à-dire à le réduire par rapport à son niveau de référence<sup>46</sup>).

<sup>46</sup> La modération du trafic est donc une réduction relative de celui-ci par rapport à son niveau de référence, ce qui sera sous-entendu dans tout le reste du rapport.

Ce levier est notamment mis en avant dans le rapport annuel 2022 du Haut Conseil pour le Climat [19]. Il est écrit, en particulier : « Le secteur aérien doit engager sa décarbonation par la maîtrise de la demande. », et « L'atteinte rapide de la décarbonation du secteur aérien à l'horizon 2030 doit être réalisée en œuvrant sur l'ensemble des leviers, y compris la forte accélération de la maîtrise de la demande d'ici 2025 ».

Différents leviers existent pour réduire ou modérer le trafic. Il est impossible de lister l'intégralité de mesures conduisant à une baisse du trafic, certaines pistes sur le sujet sont données en Parties 6.2.3 et 6.2.4. Globalement la modération (voire la réduction) du trafic peut venir des tendances suivantes :

- **La sobriété « subie »** comme cela a été le cas lors de la pandémie de COVID 19 (Partie 2.2) ;
- **La sobriété volontaire**. Cette notion fait écho notamment au phénomène de Flygskam (Partie 2.4.2) qui se traduit en France par le fait que **20 %** des Français seraient prêts à ne plus monter dans un avion pour réduire leurs émissions [186]. Néanmoins il ne faut pas surestimer l'impact de ces intentions sur le trafic réel. En effet la Figure 60 illustre les intentions de voyages recueillies en 2020 pour l'année à venir sous forme d'un diagramme de Sankey. Malgré un nombre total de trajets à venir en légère baisse (surtout concernant ceux ayant le plus voyagé en 2019), le comportement des passagers aériens est globalement stable (ceux qui ont prévu de voyager « X fois » dans l'année à venir avaient, en moyenne, voyagé « X fois » en 2019 aussi) ;

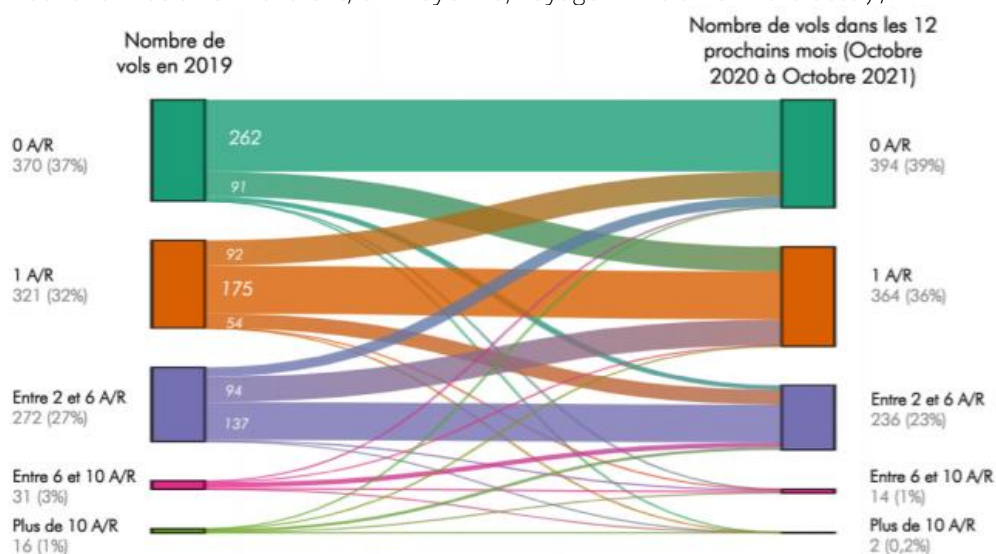


Figure 60 : Evolution des comportements et des intentions des Français avant et après la crise du COVID 19 [187]

- **La sobriété régulée** qui peut venir de l'instauration de quotas individuels sur les vols, de loteries, de restriction des créneaux de vols disponibles, de suppression de certaines liaisons aériennes, d'interdiction de l'aviation d'affaires pour les liaisons étant desservies par l'aviation commerciale, de moratoires sur les extensions et la construction de nouveaux aéroports et terminaux etc... ;
- **La hausse des coûts d'exploitation pour les compagnies**. Ces coûts peuvent provenir de différentes sources. Tout d'abord les compagnies vont devoir amortir les coûts d'investissements massifs nécessaires aussi bien sur l'achat de nouveaux avions plus efficaces que sur le développement de filières industrielles de production et d'approvisionnement des carburants alternatifs au kérosène (cf Partie 2.6.4). Par ailleurs, les compagnies vont devoir recourir à des carburants plus chers : que ce soit un kérosène dont le prix peut augmenter ou des carburants alternatifs durables, plus chers mais imposés par la réglementation. Cette hausse des coûts d'exploitation sera, a priori, reportée sur le coût des billets.
- **Les signaux prix fiscalité** qui s'ajoutent à la hausse des coûts d'exploitation des compagnies et incitent à une baisse de la demande via une hausse du prix des billets pour les consommateurs. Cette hausse des coûts peut provenir de différents éléments : systèmes de quotas (notamment l'European Union Emissions Trading System – EU ETS), systèmes de compensation (notamment via le système Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation - CORSIA), fiscalité via notamment une taxe carbone, la suppression des niches fiscales et des subventions au secteur, une taxe sur le kérosène, ou encore par une hausse de la taxe de solidarité sur les billets d'avion (ou « taxe Chirac »), par une éco-contribution.

Pour pouvoir réellement contribuer à faire baisser les émissions par rapport au scénario de référence, la réduction et/ou la modération du niveau de trafic aérien doit générer le moins possible d'effets de fuite de trafic vers d'autres aéroports (Partie 2.4.3 et Partie 5.1.5).

## 4. SCENARIOS DE TRANSITION ECOLOGIQUE ENTRE 2020 ET 2050

### 4.1. Un exercice d'élaboration de scénarios contrastés qui s'inspire de scénarios existants

Pour rappel, cette étude de l'ADEME vise à élaborer trois scénarios contrastés de transition écologique du secteur aérien entre 2020 et 2050. Ces scénarios ne sont pas des préconisations, et ne permettent pas de prédire de manière exacte l'évolution du secteur aérien et de ses impacts d'ici 2050. Ils permettent cependant d'explorer trois stratégies possibles de transition, et ainsi de contribuer aux débats autour de la transition du secteur.

Dans le cadre de cette étude, 26 scénarios qualitatifs ou quantitatifs de transition du secteur aérien élaborés par 16 organisations différentes ont été examinés (voir Tableau 9).

Tableau 9 : Scénarios étudiés dans le cadre de cette étude

Auteur	Scénario	Date	Source
ATAG	Waypoint 2050 - 2nd edition - Pushing technology and operations scénario	2021	[12]
ATAG	Waypoint 2050 - 2nd edition - Aggressive sustainable fuel deployment scénario	2021	[12]
ATAG	Waypoint 2050 - 2nd edition - Aspirational and aggressive technology perspective scénario	2021	[12]
OACI	Environmental trends in aviation to 2050	2019	[188]
IEA	ETP 2020	2020	[189]
ICSA <sup>47</sup>	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	2019	[176]
Boeing	Commercial Market Outlook 2020-2039	2020	[190]
Airbus	Global Market Forecast 2019-2038	2020	[191]
Gössling et Humpe	The global scale, distribution and growth of aviation: Implications for climate change	2020	[46]
Hassan et al	Framework Development for Performance Evaluation of the Future National Airspace System	2015	[192]
Sustainable aviation UK	Decarbonisation roadmap: a path to net zero	2020	[193]
Committee on Climate Change	Net Zero - Technical Report – Core scénario	2019	[194]
Committee on Climate Change	Net Zero - Technical Report – Further ambition scénario	2019	[194]
Committee on Climate Change	Net Zero - Technical Report – Speculative scénario	2019	[194]
Onera	Transport aérien 2050 - Des recherches pour préparer l'avenir - Unlimited Skies scénario	2010	[195]
Onera	Transport aérien 2050 - Des recherches pour préparer l'avenir - Regulatory Push-Pull scénario	2010	[195]
Onera	Transport aérien 2050 - Des recherches pour préparer l'avenir - Down-to-Earth scénario	2010	[195]
Académie de l'Air et de l'Espace	Flying in 2050	2013	[196]
A4E, ACI Europe, ASD, ERA, CANSO <sup>48</sup>	Destination 2050	2021	[197]
Transport & Environment	Roadmap to decarbonising European aviation	2018	[168]
ADEME	Les scénarios 2030-2050 – Scénario Sobriété et territorialisation dans l'urgence	2021	[198]
ADEME	Les scénarios 2030-2050 – Scénario Soutenabilité, rééquilibrage territorial et coopération	2021	[198]

<sup>47</sup> International Coalition for Sustainable Aviation

<sup>48</sup> Airlines for Europe, ACI Europe, AeroSpace and Defense Industries, European Region airline Association, Civil Air Navigation Services Organisation

ADEME	Les scénarios 2030-2050 - Scénario Techno push et métropolisation	2021	[198]
ADEME	Les scénarios 2030-2050 - Scénario Paris technique pour ne guère toucher aux modes de vie	2021	[198]
Shift Project et Supaero-Decarbo	Pouvoir voler en 2050 - Scénario Maverick	2021	[15]
Shift Project et Supaero-Decarbo	Pouvoir voler en 2050 - Scénario Iceman	2021	[15]

L'analyse et la comparaison de ces scénarios (voir Annexe 3) a permis de sélectionner deux rapports, « Destination 2050 » et « Pouvoir voler en 2050 », dont les scénarios ont été étudiés plus en détail. Ces scénarios, ainsi que les scénarios issus des rapports « Net-Zero by 2050 : A roadmap for the energy sector » de l'IEA [199] et « Aviation et climat » de l'Isae-Supaero [98], ont servi de base pour la construction des récits et des hypothèses associés aux trois scénarios de transition.

#### 4.2. Une étude qui repose sur une consultation des parties prenantes du secteur

Une large consultation des parties prenantes du secteur aérien a été organisée au démarrage de cette étude afin de faire un état des lieux des connaissances disponibles et des débats actuels autour de la transition de ce secteur. Trois ateliers de travail ont été organisés avec ces parties prenantes lors des mois de mai et de juin 2021. Ces ateliers ont permis aux participants de s'exprimer sur les sujets suivants :

- L'ambition climatique dans chacun des scénarios de transition (atelier 1 – 19 mai 2021) ;
- Les leviers de décarbonation du secteur (atelier 2 – 09 juin 2021) ;
- Les mesures de mise en œuvre des scénarios (atelier 3 – 29 juin 2021).

Tableau 10 : Participants aux ateliers de travail de consultation sur l'étude

Types de parties prenantes	Nombre de participants	Exemples
Constructeurs	10	Airbus, Dassault Systèmes, Safran
Régulateurs	9	DGAC, DGEC
Aéroports	6	ADP, Côte d'Azur aéroports
Associations professionnelles	5	FNAM, UAF & FA, GIFAS
Compagnies aériennes	4	Air France, Transavia
Transporteurs	1	Bolloré Logistics
Associations environnementales	5	ACNUSA, Collectif ICARE, ATECOPOL
Associations de défense des riverains	5	UFCNA
Associations de consommateurs	1	FNAUT
Recherche	9	Isae-Supaero, ONERA
Consultants	3	
Total	58	

Lors des deux derniers ateliers, les participants ont été répartis en groupes de travail et ont travaillé sur les sujets proposés (leviers de décarbonation et mesures de mise en œuvre de scénarios) grâce à des outils collaboratifs. Les séances de travail en sous-groupe se sont avérées particulièrement riches en enseignements, puisqu'elles ont été le lieu de débats sur la pertinence de certains leviers et mesures.

Chacun de ces ateliers a fait l'objet d'un compte-rendu, qui a été mis à disposition sur une [plateforme collaborative](#) permettant la poursuite des débats à l'issue des ateliers. Cette plateforme a par ailleurs donné l'occasion aux parties prenantes de partager la littérature qui leur semblait pertinente par rapport à l'étude, et d'accéder aux supports de présentation utilisés pendant les ateliers.

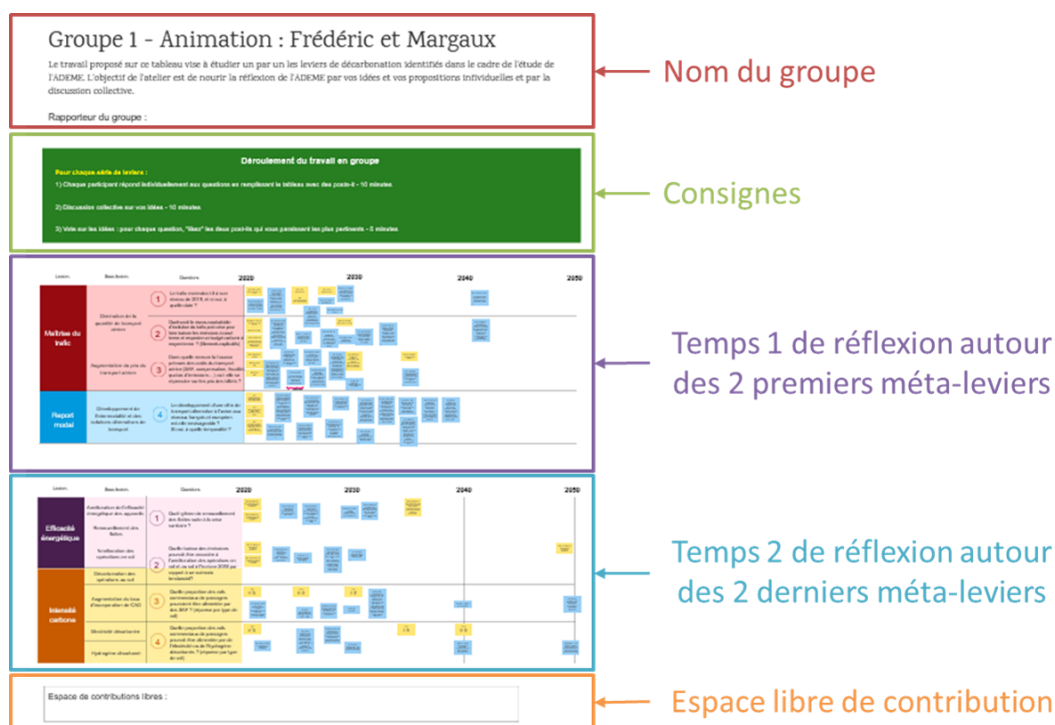


Figure 61 : Aperçu du travail réalisé par les participants lors du deuxième atelier de travail

### 4.3. Des scénarios co-construits par l'ADEME, la DGAC et la DGEC

Les ateliers de travail avec les parties prenantes ont par conséquent permis d'enrichir les réflexions autour des récits possibles de transition écologique du secteur aérien. Ces premiers ateliers ont été suivis d'ateliers de travail supplémentaires entre l'ADEME, la DGAC et la DGEC dont l'objectif était de co-construire les récits et les hypothèses d'un scénario de référence et de trois scénarios contrastés de transition.

À l'issue de ce travail sur les scénarios, et une fois la modélisation de leurs impacts environnementaux stabilisée, l'ADEME a organisé en février 2022 un webinaire de présentation des résultats provisoires de l'étude aux parties prenantes du secteur qui avaient participé aux trois ateliers de consultations. Ce webinaire a permis à ces parties prenantes de découvrir et de commenter les récits de transition associés à chaque scénario (Partie 4.4.1), ainsi que les estimations provisoires de leurs impacts CO<sub>2</sub> (Partie 5.1), environnementaux (Partie 5.2) et socio-économiques (Partie 5.3).

### 4.4. Récits et hypothèses générales associés au scénario de référence et aux scénarios de transition

#### 4.4.1. Récits généraux

Pour s'assurer de construire des scénarios de transition contrastés (Partie 1.1), l'ADEME, la DGAC, la DGEC et l'Care ont tout d'abord défini des récits associés à chacun des scénarios de transition ainsi qu'au scénario de référence :

- **Scénario 0 intitulé « Scénario de référence » ou « S0 »** : Le trafic aérien<sup>49</sup> se développe selon les tendances actuelles, sans modulation du trafic ou commercialisation de nouveaux modèles d'avions par rapport à ceux disponibles aujourd'hui ;
- **Scénario A intitulé « Rupture technologique » ou « SA »** : Des investissements importants sont réalisés dans l'aéronautique et la production de CAD, afin de conserver un niveau de trafic élevé et de permettre au secteur de poursuivre sa croissance économique ;
- **Scénario B intitulé « Modération du trafic » ou « SB »** : Des mesures de réduction et de modération du trafic (en PKTeq) et les CAD sont mobilisés pour minimiser les émissions cumulées entre 2020 et 2050 et réduire nettement les émissions d'ici 2030 ;
- **Scénario C intitulé « Tous leviers » ou « SC »** : La décarbonation du secteur s'appuie sur tous les leviers disponibles afin de réduire le recours à des technologies de rupture coûteuses et d'augmenter l'acceptabilité des mesures de modération du trafic.

Les récits détaillés associés à chacun des scénarios sont disponibles dans la Figure 62 ci-dessous.

<sup>49</sup> Dans toute cette partie ainsi que dans les suivantes, l'unité utilisée pour les évolutions de trafic est le Passager-équivalent-Kilomètre-Transporté (PKTeq).



Absence de subventions publiques à l'achat de carburants durables (CAD = biocarburants et électrocarburants) ou d'hydrogène, pour tous les scénarios





















<b>S0</b> <b>« Scénario de référence »</b>	<b>SA</b> <b>Scénario « Rupture technologique »</b>	<b>SB</b> <b>Scénario « Modération du trafic »</b>	<b>SC</b> <b>Scénario « Tous leviers »</b>
<p> La société se développe selon les tendances actuelles, sans modération du trafic ou déploiement de technologies allant au-delà des technologies déjà maîtrisées actuellement.</p> <p> Absence de rupture technologique : les flottes sont modernisées via le remplacement des avions en fin de vie par les avions les plus performants disponibles aujourd'hui.</p> <p> Les avions continuent d'utiliser quasi exclusivement des carburants fossiles (le kérosène).</p> <p> Le prix des billets d'avions reste stable : la légère hausse du prix du kérosène est compensée par les progrès en termes d'efficacité énergétique permis par le renouvellement des flottes.</p> <p> Pas de frein au recours à l'avion, ce qui conduit à une augmentation forte du trafic.</p>	<p> Des investissements importants sont réalisés dans l'aéronautique et la production de CAD, afin de conserver un niveau de trafic élevé et de permettre au secteur de développer son activité.</p> <p> Des ruptures technologiques et de fortes améliorations des opérations permettent de diminuer significativement la consommation énergétique des avions à partir de 2035. L'avion court-courrier à hydrogène voit le jour en 2035.</p> <p> Les CAD sont progressivement mobilisés grâce à des efforts d'investissement très importants (et ce plus particulièrement sur les électrocarburants).</p> <p> L'utilisation de technologies plus onéreuses et des CAD renchérit rapidement le coût des vols à partir de 2035.</p> <p> La croissance du trafic aérien est soutenue, mais infléchi par la hausse des coûts des vols, à partir de 2030.</p>	<p> Des mesures de modération du trafic et les CAD sont mobilisés pour minimiser les émissions cumulées entre 2020 et 2050 et réduire nettement les émissions d'ici 2030.</p> <p> Les nouveaux avions bénéficient des améliorations technologiques incrémentales. L'avion à hydrogène n'est pas développé.</p> <p> Les CAD sont progressivement mobilisés grâce à des efforts d'investissement importants (et ce plus particulièrement sur les biocarburants).</p> <p> L'utilisation de CAD augmente le coût des vols à partir de 2030. Cette hausse s'accélère à partir de 2035.</p> <p> Le trafic est contraint par des leviers fiscaux et réglementaires dans l'optique de limiter les émissions du secteur, et ce dès 2023. Il est également limité par la hausse du prix des billets, à partir de 2030. Il diminue donc entre 2023 et 2030, est stable jusqu'en 2045, puis remonte légèrement à partir de cette date.</p>	<p> La décarbonation du secteur s'appuie sur tous les leviers disponibles afin de réduire le recours à des technologies de rupture non-matures aujourd'hui et d'augmenter l'acceptabilité des mesures de modération du trafic.</p> <p> Des progrès technologiques et des améliorations des opérations permettent de diminuer la consommation énergétique des avions à partir de 2040.</p> <p> Les CAD ne sont pas produits en quantité suffisante pour couvrir la demande. Le premier avion court-courrier à hydrogène est commercialisé en 2040.</p> <p> L'utilisation de technologies plus onéreuses et des CAD renchérit progressivement le coût des vols.</p> <p> Les mesures de modération du trafic et la hausse du prix des billets conduisent à une faible hausse du trafic.</p>

Figure 62 : Récits détaillés associés à chacun des scénarios

Ces récits correspondent à des degrés différenciés de mobilisation des leviers de décarbonation à disposition du secteur aérien (Figure 63).

0 : Levier non mobilisé 1 : Levier faiblement mobilisé 2 : Levier moyennement mobilisé 3 : Levier fortement mobilisé	S0 – Scénario de référence	SA – Rupture technologique	SB – Modération du trafic	SC – Tous leviers
Décarbonation du mix énergétique	0	3	2	2
<i>Biocarburants d'aviation durable</i>	0	3	2	2
<i>Progrès techno. sur les biocarburants</i>	0	3	2	2
<i>Electrocarburants</i>	0	3	2	2
<i>Hydrogène décarboné</i>	0	3	0	2
Amélioration de l'efficacité énergétique des flottes	1	3	1	2
<i>Gains efficacité des nouveaux avions à kérosène</i>	0	3	1	2
<i>Date commercialisation 1<sup>ers</sup> avions à hydrogène</i>	0	3	0	2
<i>Rythme de renouvellement des flottes</i>	1	3	1	2
<i>Amélioration des opérations</i>	1	3	2	2
Augmentation du taux de remplissage des appareils	1	1	3	2
Report modal	1	1	3	2
Modération / Réduction du trafic	0	1	3	2

SA : "Rupture technologique" → Mobilisation prioritaire des leviers technologiques et opérationnels  
 SB : "Modération du trafic" → Mobilisation prioritaire du levier "Maîtrise du trafic"  
 SC : "Tous leviers" → Pas de levier prioritaire - mobilisation équilibrée de tous les leviers

Figure 63 : Leviers de décarbonation du secteur aérien mobilisés dans chacun des scénarios

Ce travail a enfin permis de proposer des hypothèses pour chacun des scénarios, hypothèses principalement issues des scénarios disponibles au moment de l'étude (Partie 4.1). Par exemple, pour les hypothèses relatives aux gains d'efficacité énergétique des flottes aériennes dans les différents scénarios, il a été décidé d'associer au scénario A les hypothèses de progrès les plus optimistes trouvées dans la littérature, alors que les hypothèses les plus conservatives ont été associées au scénario B, et que les hypothèses médianes l'ont été au scénario C.

Ces hypothèses sont détaillées dans la suite de la Partie 4.4, en commençant par les hypothèses relatives à l'amélioration de l'efficacité énergétique des flottes (Partie 4.4.2), puis celles liées à la baisse de l'intensité carbone du mix énergétique (Partie 4.4.3), à l'amélioration des taux de remplissage (Partie 4.4.4) et à l'évolution du trafic dans les scénarios (Partie 4.4.5)

## 4.4.2. Baisse de l'intensité carbone du mix énergétique

### 4.4.2.1. Technologies de production des biocarburants d'aviation durables

Dans le **scénario de référence**, aucun biocarburant d'aviation durable n'est produit.

Dans les **scénarios de transition**, les biocarburants produits sont tous des biocarburants d'aviation durables. Le terme de « biocarburants » dans la suite de ce document ne renverra donc que vers des biocarburants de deuxième ou de troisième génération.

Les biocarburants sont tout d'abord produits à l'aide de la technologie HEFA<sup>50</sup> avant 2030. Par conséquent, ces biocarburants émettent 65 % de CO<sub>2</sub> en moins par rapport au kérosène sur l'ensemble du cycle de vie (production, transport, combustion) [15][98].

<sup>50</sup> Cette technologie, qui est aujourd'hui mature, permet de produire du kérosène paraffinique synthétique à partir d'esters et d'acides gras hydrotraités (« Hydroprocessed Esters and Fatty Acids»). Les gisements de ressources mobilisés sont par exemple les huiles de cuissons usagées ou les résidus de graisses animales. Sont exclus de cette étude les biocarburants produits à partir de cette technologie et d'huile de palme. En effet, ceux-ci sont associés à des changements d'usages des terres qui impactent négativement leur intérêt climatique.

A partir de 2030, les biocarburants commencent également à être produits à partir de la technologie FT<sup>51</sup> et de certains résidus d'agriculture et d'agroforesterie disponibles en France. Cette deuxième filière de production se développe de manière très rapide entre 2030 et 2040 dans tous les **scénarios de transition**, si bien qu'à partir de 2040, l'intégralité des biocarburants sont produits à partir de cette dernière technologie. Les biocarburants ainsi produits émettent 88 % de CO<sub>2</sub> en moins par rapport au kérosène lors de leur production, de leur transport et de leur combustion [15][98].

Dans le **scénario A**, des progrès technologiques supplémentaires permettent de faire passer ce taux de 88 % à 95 % entre 2040 et 2050, comme dans le rapport « Destination 2050 » [197].

Les évolutions des taux de décarbonation<sup>52</sup> moyens du mix de biocarburants utilisés dans les différents scénarios sont linéaires entre chaque date clé (correspondant à des changements de technologies et/ou de gisements) (Tableau 11).

Tableau 11 : Evolution du taux de décarbonation moyen du mix de biocarburants utilisés dans les différents scénarios de transition (sachant que le taux moyen évolue de manière linéaire entre deux décennies)

Taux moyen de décarbonation du mix de biocarburants	SA	SB	SC
En 2020	65 %	65 %	65 %
En 2030	65 %	65 %	65 %
En 2040	88 %	88 %	88 %
En 2050	95 %	88 %	88 %

Dans tous les scénarios, aucun volume de biocarburants n'est importé ou exporté (il s'agit d'une hypothèse simplificatrice). Ainsi, les biocarburants incorporés dans les vols au départ de la France le sont à partir des résidus de culture et d'agroforesterie disponibles et pertinents sur le sol français. En 2050, les ressources disponibles pour la production de biocarburants sont résumées dans le Tableau 12.

Tableau 12 : Potentiel de mobilisation pour chaque projection (kilo tonnes de Matière Sèche) dans le scénario B exploratoire<sup>53</sup> du rapport "La biomasse agricole : quelles ressources pour quel potentiel énergétique ?" de France Stratégie [200]

Potentiel de mobilisation pour chaque projection (ktMS)	
Résidus de cultures annuelles	8 420
Cultures intermédiaires	19 300
Plantes à fibres	1 270
Haies et agroforesterie	5 120
Total	34 110

#### 4.4.2.2. Technologies de production d'électrocarburants

Aucun électrocarburant n'est produit dans le scénario de référence.

Dans les **scénarios de transition**, les premiers électrocarburants<sup>54</sup> sont produits à partir de 2030. Ces électrocarburants sont produits à partir d'électricité bas-carbone et de CO<sub>2</sub> capté à la sortie d'installations industrielles. A noter que ce captage de CO<sub>2</sub> implique également une consommation

<sup>51</sup> La réaction de Fischer-Tropsch permet de transformer après gazéification les résidus de culture et d'agroforesterie ainsi que les déchets municipaux en biocarburants, notamment à destination du secteur aérien.

<sup>52</sup> Une énergie associée à un taux de décarbonation de 0% correspond à une énergie qui émet autant de CO<sub>2</sub> sur l'ensemble de son cycle de vie par unité d'énergie que le kérosène, une énergie à 50% à une énergie qui deux fois moins de CO<sub>2</sub> par unité d'énergie que le kérosène et une énergie à 100% à une énergie totalement neutre en carbone (cas seulement théorique).

<sup>53</sup> Ce scénario fait notamment l'hypothèse du développement à grande échelle de l'agriculture biologique et des pratiques agroécologiques en France entre 2019 et 2050 [200].

<sup>54</sup> Pour rappel, les électrocarburants, tout comme les biocarburants, sont des carburants dit « drop-in », c'est-à-dire qui peuvent être utilisés pour les avions actuels immédiatement et ne nécessitent pas ou peu d'évolutions sur les moteurs et les avions existants.

d'électricité. Ainsi, dans tous les scénarios, il faut 2,8 kWh d'électricité pour produire 1 kWh d'électrocarburants<sup>55</sup> [15].

Dans tous les scénarios, aucun volume d'électrocarburant n'est importé ou exporté (il s'agit d'une hypothèse simplificatrice). La pertinence des électrocarburants comme levier de décarbonation dépend donc de l'intensité carbone moyenne du mix électrique du pays de départ des vols, c'est-à-dire le pays où ils sont produits. Si cette intensité est trop élevée, les émissions de CO<sub>2</sub> associées à la production de l'électricité nécessaire à la production des électrocarburants seront plus élevées que les gains d'émissions associés à la substitution du kérosène par ces électrocarburants. Dans le cas contraire, ces électrocarburants représentent réellement un levier de décarbonation.

Pour que les électrocarburants représentent un levier de décarbonation, il faut donc que l'intensité carbone moyenne du mix électrique du pays de départ des avions soit inférieure à 109 gCO<sub>2</sub>/kWh.

Pour identifier les pays pour lesquels l'intégration d'électrocarburants dans les vols est pertinente, les scénarios se basent sur les projections de l'évolution de l'intensité carbone moyenne du mix électrique issues :

- **Pour la France** : du scénario N2 de l'exercice prospectif « Futurs énergétiques 2050 » de RTE. Ce scénario repose sur la complémentarité de l'électricité d'origine nucléaire et de celle renouvelable. Dans celui-ci, l'électrification de la France repose en majorité sur le développement des énergies renouvelables, mais aussi dans une moindre mesure sur la modernisation du parc nucléaire français. A partir de 2035, deux réacteurs nucléaires de troisième génération sont construits tous les cinq ans<sup>56</sup> [202].
- **Pour le reste du monde** : du scénario APS (*Announced Pledges Scenario*) issu de l'édition 2021 du *World Energy Outlook* (WEO 2021) de l'Agence Internationale de l'Energie (AIE). Ce scénario fait les hypothèses suivantes :
  - Réalisation intégrale de toutes les promesses nationales annoncées dans les Contributions Déterminées au niveau National<sup>57</sup> de réduction nette de la consommation d'énergie ;
  - Doublement de la production mondiale d'électricité ;
  - Diminution de l'utilisation des énergies fossiles [203].

Ces projections sont disponibles dans la Figure 64 ci-dessous. Comme cela est visible sur celle-ci, l'intensité carbone du mix électrique mondial diminue de manière significative entre 2030 et 2050, mais reste en moyenne supérieure au seuil de 109 gCO<sub>2</sub>/kWh, notamment du fait de la lente diminution de l'intensité carbone du mix africain et de l'intensité très élevée du mix actuel de l'Asie-Pacifique. Au contraire, les mix électriques de l'Union Européenne, de l'Amérique du Sud et de la France sont toujours inférieurs à ce seuil, notamment grâce au poids du nucléaire et des énergies renouvelables dans ceux-ci.

**Enseignement n°1 : si les pays signataires de l'Accord de Paris atteignent leurs objectifs actuels, la production d'électrocarburants ne sera pas un levier pertinent de décarbonation pour les vols au départ de l'Amérique du Nord, de l'Asie, de l'Afrique et de l'Océanie.**

Par conséquent, les régions du monde pour lesquelles les électrocarburants sont considérés comme pertinents dans les scénarios de transition, c'est-à-dire aux départs desquelles les avions embarquent des électrocarburants, sont les suivantes :

- France métropolitaine : il est en effet considéré que les capacités de production d'électricité des Outre-mer ne seront pas assez décarbonées à l'horizon 2050 ;
- Union Européenne ;
- Reste Europe (Espace Economique Européen, Balkans, Royaume-Uni, Turquie, Israël et Groenland), même si les électrocarburants sont pertinents seulement à partir de 2040 pour cette région ;
- Amérique centrale et du Sud.

<sup>55</sup> A noter qu'il serait également possible que des électrocarburants soient produits dans les scénarios à partir de CO<sub>2</sub> capturé directement dans l'air. Ce mode de production étant 1,6 fois plus énergivore que celui réalisé à partir de CO<sub>2</sub> capturé directement à la sortie d'installations industrielles, il est écarté dans la suite de l'étude [15].

<sup>56</sup> A noter que ce scénario est cohérent avec les annonces faites par le Président de la République lors de son discours à Belfort le 10 février 2022 [201].

<sup>57</sup> Les CDN sont les engagements pris par chaque pays ayant signé l'Accord de Paris.

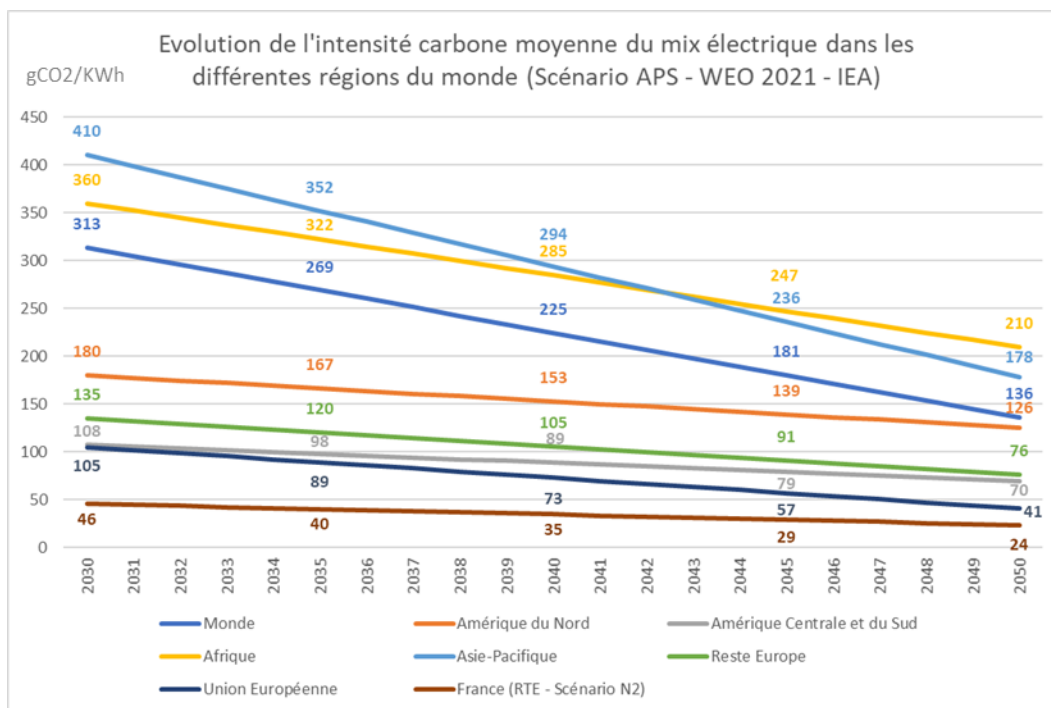


Figure 64 : Evolution de l'intensité carbone moyenne du mix électrique dans les différents régions du monde (Scénario APS - WEO 2021 - IEA)<sup>58</sup> [203]

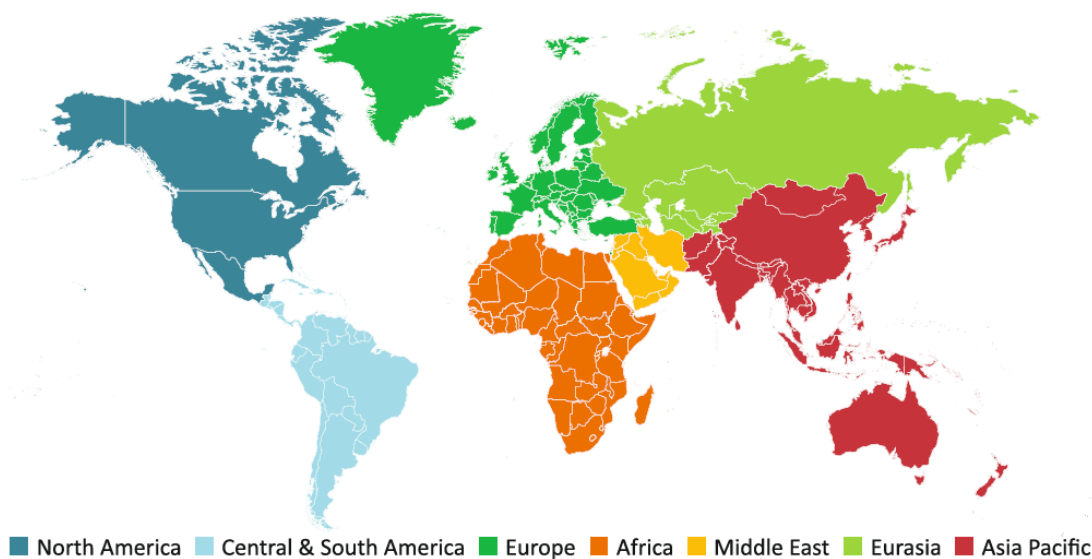


Figure 65 : Répartition des pays par régions dans l'édition 2021 du WEO de l'AIE [203]

Le taux de décarbonation des électrocarburants dans les différents scénarios évolue donc au cours du temps en fonction de l'évolution de l'intensité carbone moyenne du mix électrique des différentes régions où ils sont produits (Europe et Amérique du Sud et Centrale). Dans tous les **scénarios de transition**, il est supposé que la répartition des origines et destinations géographiques des vols reste constante entre 2019 et 2050. Cette hypothèse permet de calculer l'intensité carbone moyenne du mix électrique utilisé pour produire des électrocarburants dans les vols à destination de la France (Figure 66).

<sup>58</sup> Les évolutions de l'intensité carbone moyenne des mix électriques de l'Eurasie et du Moyen-Orient entre 2030 et 2050 sont également trop élevées pour rendre la production d'électrocarburants pertinente du point de vue climatique. A noter également que les valeurs de la Figure 64 ont été calculées à l'aide des données de l'édition 2019 du WEO de l'AIE [35], ainsi que des données d'intensité d'émissions tout au long du cycle de vie de la base carbone de l'ADEME [107] pour la France et du GIEC pour le reste du monde [172].



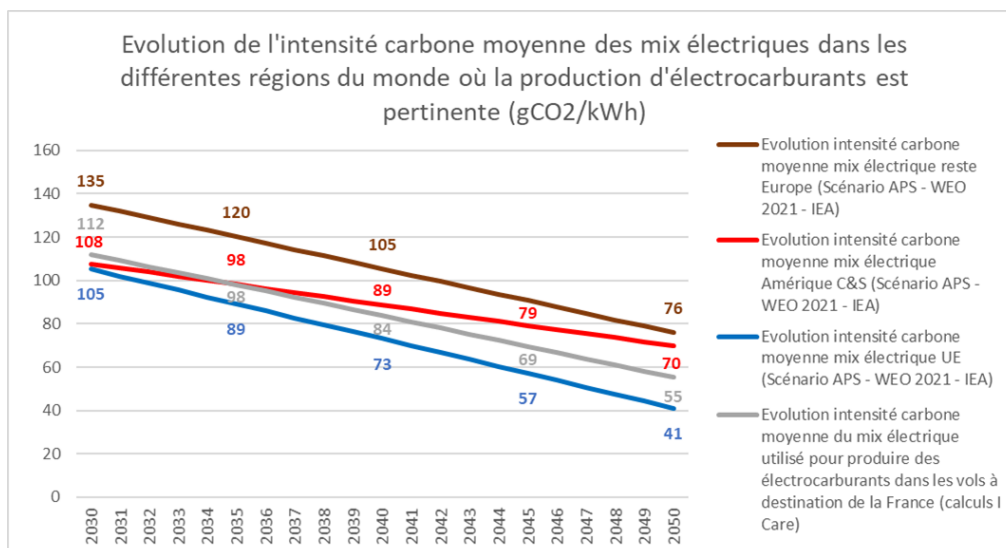


Figure 66 : Evolution de l'intensité carbone moyenne des mix électriques dans les différentes régions du monde où la production d'électrocarburants est pertinente (gCO<sub>2</sub>/kWh), entre 2030 et 2050 (d'après [203] [35] [107] [172])

Cette intensité carbone moyenne correspond à la moyenne des intensités carbone moyennes des mix électriques des régions pertinentes pondérées par leur poids respectif en termes de consommations de carburants en 2019 (ces poids étant supposés constants entre 2019 et 2050 – voir Tableau 13) [204].

Tableau 13 : Poids des différents mix électriques dans le calcul de l'intensité carbone moyenne des mix électriques dans les différentes régions du monde où la production d'électrocarburants est pertinente [204]

Région du monde pour laquelle la production d'électrocarburants est pertinente entre 2030 et 2050	Consommation de kérosène en 2019 (Mt)	Part dans le total
Amérique Centrale et du Sud	1,65	24%
UE (28)	3,79	55%
Reste « Europe »	1,46	21%

Par ailleurs, la proportion de vols au départ ou en provenance des régions du monde pour lesquelles la production d'électrocarburants est pertinente était en 2019 au total de :

- 37 % pour les vols internationaux en 2019 à destination ou en provenance de la France métropolitaine ;
- 10 % pour les vols internationaux à destination ou en provenance de l'Outre-mer [204].

Comme évoqué plus haut, ces proportions sont supposées constantes dans le temps.

Dans tous les scénarios, les avions embarquent des électrocarburants si et seulement s'ils constituent un levier de décarbonation des vols, et donc si les émissions associées à l'ensemble de leur cycle de vie (production, transport, combustion) sont inférieures à celles associées à l'ensemble du cycle de vie du kérosène.

Il est alors possible de calculer la part des vols qui peuvent contenir des électrocarburants en fonction de leur origine et de leur destination, et ce à partir des proportions calculées ci-dessus ainsi que de la répartition des consommations de carburants par origine et destination en 2019.

Tableau 14 : Proportion des vols pouvant embarquer des électrocarburants dans les scénarios de transition par faisceau (ces proportions restant constantes entre 2019 et 2050)

Faisceau	Consommation de carburants en 2019 (Mt) [204]	Proportion des vols pouvant embarquer des électrocarburants entre 2030 et 2050		Commentaire
		Vols au départ et à l'arrivée de la France	Vols au départ de la France	
Intérieur métropole	2,12	100 %	100 %	Tous les vols au départ de la France métropolitaine peuvent embarquer des électrocarburants produits en métropole.
OM – OM	0,15	0 %	0 %	Aucun vol au départ de l'Outre-mer ne peut embarquer des électrocarburants du fait du mix électrique trop carboné de cette région
Métropole – OM	2,60	50 %	50 %	Tous les vols au départ de la France métropolitaine peuvent embarquer des électrocarburants produits en métropole. Ce n'est pas le cas pour les vols au départ de l'Outre-mer du fait du mix électrique trop carboné de cette région.
Métropole – International	18,42	69 %	100 %	Tous les vols au départ de la France métropolitaine peuvent embarquer des électrocarburants produits en métropole. 19% des vols au départ de l'international et à destination de la France métropolitaine peuvent embarquer des électrocarburants
OM – International	0,44	5 %	0 %	Aucun vol au départ de l'Outre-mer ne peut embarquer des électrocarburants du fait du mix électrique trop carboné de cette région. 5% des vols au départ de l'international et à destination de l'Outre-mer peuvent embarquer des électrocarburants.
Vols intérieurs	4,86	70 %	70 %	Moyenne pondérée des résultats précédents
Vols internationaux	18,86	67 %	98 %	Moyenne pondérée des résultats précédents

Ainsi, en moyenne, la proportion des vols pouvant embarquer des électrocarburants entre 2020 et 2050 dans tous les **scénarios de transition** est de :

- 70 % pour les vols intérieurs ;
- 67 % pour les vols internationaux au départ et à l'arrivée de la France ;
- 98 % pour les vols internationaux au départ de la France.

A partir de ces proportions et des évolutions des intensités carbone moyenne des mix électriques de la France métropolitaine (Figure 64) et des régions pertinentes du monde du point de vue de la production d'électrocarburants bas-carbone (Figure 66), il est possible de déduire l'évolution des taux de décarbonation<sup>59</sup> des électrocarburants dans les **scénarios de transition** (Figure 67).

<sup>59</sup> Pour rappel, une énergie associée à un taux de décarbonation de 0% correspond à une énergie qui émet autant de CO<sub>2</sub> sur l'ensemble de son cycle de vie par unité d'énergie que le kérosène, une énergie à 50% à une énergie qui émet deux fois moins de CO<sub>2</sub> par unité d'énergie que le kérosène et une énergie à 100% à une énergie totalement neutre en carbone (cas seulement théorique).

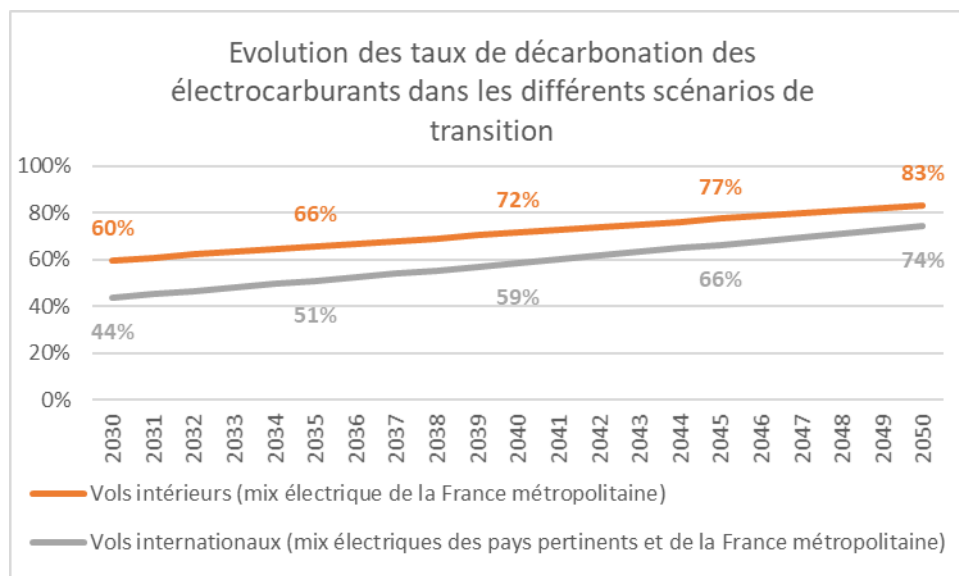


Figure 67 : Evolution du taux de décarbonation des électrocarburants dans les différents scénarios de transition (Périmètre « Départs et arrivées France »)

#### 4.4.2.3. Incorporation de biocarburants et d'électrocarburants

Les avions conventionnels consommant du kérosène peuvent embarquer des CAD, c'est-à-dire des biocarburants (Partie 4.4.2.1) ou des électrocarburants (Partie 4.4.2.2). Le taux de CAD pouvant être embarqués dans les avions CMC et LC est actuellement de 50 %, et augmente en fonction du temps et de scénarios (Figure 68). Deux approches sont possibles pour établir des projections des taux d'incorporation des CAD :

- Etablir des projections des capacités françaises et mondiales de production de biocarburants et d'électrocarburants, et en déduire les quantités de CAD pouvant être embarqués dans les avions ;
- Utiliser les objectifs d'incorporation de la « Feuille de route française pour le déploiement des biocarburants aéronautiques durables » qui portent sur les vols au départ de la France<sup>60</sup> [166] et ceux en cours de discussion au niveau européen dans le cadre du Paquet législatif « Fit for 55 » et qui concernent les vols au départ de l'Union Européenne [205].

Tableau 15 : Mandats d'incorporation de CAD pour les vols au départ de l'Union Européenne en cours de discussion au niveau européen [205]

Date	Part de CAD min. dans le mix de carburants	Dont part minimale d'électrocarburants
2025	2 %	0 %
2030	5 %	1 %
2035	20 %	5 %
2040	32 %	8 %
2045	38 %	11 %
2050	63 %	28 %

Pour pouvoir être réalisée, la première approche nécessite de disposer de projections fiables des capacités de production de CAD. Cependant, il existe aujourd'hui de nombreuses incertitudes sur les gisements de résidus d'agriculture et d'agroforesterie qui seront disponibles en 2050 pour le secteur aérien, puisque cette ressource est par nature limitée et fortement demandée par d'autres secteurs (transport routier, construction...). Par ailleurs, les capacités de production d'électrocarburants dépendront surtout de la quantité d'investissements qui seront réalisés dans des unités de production de ces carburants et des énergies renouvelables dédiées à leur fabrication. Les futures capacités de production de CAD françaises et internationales dépendent en fait des choix de politiques publiques qui

<sup>60</sup> Ces objectifs sont d'incorporer a minima 2% de biocarburants en 2025 et 5% en 2030 dans les vols au départ de la France.

seront réalisés durant les prochaines années, et de la priorité qui sera donnée au secteur aérien par rapport aux autres secteurs de l'économie.

La nature de ces choix est par nature imprévisible, mais des premières orientations politiques peuvent être perçues au travers des objectifs français et internationaux. Les projections de mandats d'incorporation de CAD utilisées dans les différents scénarios reposent donc sur la deuxième approche. Tous les scénarios respectent ainsi les objectifs actuels français et ceux en discussion au niveau européen (Tableau 15), et les scénarios A et B vont même au-delà<sup>61</sup>.

En effet, le **scénario A** est un scénario de « Rupture Technologique », où de nombreux investissements sont réalisés dans les capacités de production de CAD et où le secteur aérien fait partie des secteurs d'activités considérés comme prioritaires pour les consommations de résidus d'agriculture et d'agroforesterie et d'électricité renouvelable par les gouvernements. Dans le **scénario B**, les besoins en CAD sont moindres du fait d'un trafic réduit (Partie ), ce qui permet une intégration poussée de ces carburants alternatifs dans le mix énergétique utilisé dans les avions. Le **scénario C** respecte quant à lui quasi strictement les mandats du Paquet Législatif « Fit for 55 » (Tableau 15).

Tableau 16 : Taux d'incorporation des CAD dans les différents scénarios de transition écologique

	SA	SB	SC	Objectifs « Fit for 55 <sup>62</sup> »
Mandat d'incorporation des biocarburants en 2030 (en volume)	5 %	5 %	5 %	5 % (tous CAD confondus)
<i>Mandat d'incorporation des électrocarburants en 2030 (en volume - seulement pour les vols pertinents)</i>	1 %	1 %	1 %	Au moins 1 %
Mandat d'incorporation des biocarburants en 2040 (en volume)	21 %	23 %	20 %	32 % (tous CAD confondus)
<i>Mandat d'incorporation des électrocarburants en 2040 (en volume - seulement pour les vols pertinents)</i>	21 %	23 %	12 %	Au moins 8 %
Mandat d'incorporation des biocarburants en 2050 (en volume)	28 %	50 %	28 %	63% (tous CAD confondus)
<i>Mandat d'incorporation des électrocarburants en 2050 (en volume - seulement pour les vols pertinents)</i>	53 %	50 %	35 %	Au moins 28 %

A noter que tous les vols au départ et à l'arrivée de la France embarquent une proportion de biocarburants correspondant aux mandats des scénarios, mais que seuls les vols pertinents (Tableau 14) embarquent la quantité d'électrocarburants prévue dans les différents scénarios (Tableau 16).

Dans les scénarios de transition, les taux d'incorporation de CAD correspondent donc aux mandats d'incorporation retenus dans le Tableau 16 (dans la limite des capacités des avions à embarquer des CAD, voir Partie 4.4.3), et progressent de manière géométrique entre deux décennies (c'est-à-dire entre 2020 et 2030, entre 2030 et 2040 et entre 2040 et 2050).

#### 4.4.2.4. Incorporation d'hydrogène bas-carbone

La capacité d'embarquement d'hydrogène par les avions dépend de leur capacité à utiliser cette énergie (Partie 4.4.3.2). Dans les scénarios, il est fait l'hypothèse qu'aucune quantité d'hydrogène bas-carbone n'est exportée ni importée, et que tous les pays au départ desquels partent des avions à hydrogène produisent suffisamment de cette énergie pour satisfaire les besoins des vols. Les vols dans lesquels l'hydrogène bas-carbone est utilisé sont seulement les vols de très courte distance (effectués à l'aide de commutateurs, c'est-à-dire d'avion très court-courriers), les vols régionaux et les vols court-courriers (de moins de 2000 km), et ce uniquement dans les **scénarios A** et **C**. Dans ces scénarios, les vols court-

<sup>61</sup> Pour rappel, le taux d'incorporation de CAD est de 0 % dans le scénario S0 de référence.

<sup>62</sup> A noter que ces objectifs d'incorporation sont des propositions de la Commission Européenne qui sont actuellement débattues au niveau européen. Les objectifs retenus dans le cadre de cette étude sont donc des valeurs provisoires, et les objectifs qui pourraient être retenus par l'Union Européenne pourraient être moins ambitieux (voir par exemple [206]).

courriers sont assimilés aux vols en provenance et à destination de « l'Europe », au sens de l'exercice WEO 2021 (Figure 65).

Dans tous les scénarios, il est fait l'hypothèse que la répartition du trafic par type de vols (commuters, régionaux, court-courriers, moyen-courriers et long-courriers) reste constante entre 2019 et 2050. Ainsi, les consommations d'hydrogène bas-carbone peuvent au maximum couvrir 9,4 % du trafic entre 2020 et 2050 dans les différents **scénarios de transition** (Tableau 17).

Tableau 17 : Répartition du trafic par type de vols entre 2019 et 2050 dans les différents scénarios de transition

Type de vols	Répartition du trafic entre 2019 et 2050
Commuters (moins de 19pax <sup>63</sup> /moins de 500km)	0,3 % [15]
Avion transport régional (20-80 pax/moins de 1000km)	1,0 % [15]
Court-courrier (81-165 pax/moins de 2000km)	8,1 % [15]
Moyen-courrier (166-250 pax/moins de 7000km)	34,4 % [6]
Long-courrier (plus de 250pax/jusqu'à 12000km)	56,2 % [6]

#### 4.4.3. Amélioration de l'efficacité énergétique des flottes

L'amélioration de l'efficacité énergétique des flottes est un des leviers majeurs de décarbonation du secteur aérien. Dans chacun des scénarios, des hypothèses sont ainsi prises sur le rythme de développement de nouveaux modèles d'avions plus efficaces, pouvant embarquer plus de carburants alternatifs voire recourant même à des technologies de rupture, ainsi que sur le rythme de renouvellement des flottes aériennes.

##### 4.4.3.1. Amélioration de l'efficacité énergétique des avions à kérosène

Dans le **scénario 0 « Scénario de référence »**, aucun nouveau modèle d'avion n'est développé en plus de ceux commercialisés en 2020. Les flottes sont ainsi modernisées avec les avions les plus efficaces aujourd'hui sur le marché. Ces avions sont par exemple les A320 Néo et les B737 Max pour les vols court-et-moyen-courriers, et les A350 et B787 pour les vols long-courriers. Ces avions permettent des gains en termes d'efficacité énergétique de l'ordre de 20% pour les avions court-et-moyen-courriers (CMC) et de l'ordre de 25% pour les avions long-courriers (LC) par rapport à la moyenne des avions actuels. Ainsi, dans le scénario de référence, l'efficacité énergétique des flottes s'accroît de manière tendancielle grâce à ces appareils.

##### 4.4.3.1.1. De nouveaux avions à kérosène plus efficaces commercialisés entre 2035 et 2040 selon les scénarios

Dans les **scénarios de transition**, de nouvelles générations d'avions à kérosène court, moyen et long-courriers apparaissent à différents horizons temporels. Les nouveaux appareils CMC et LC à kérosène ont tous pour point commun d'être plus efficaces que les meilleurs avions existants aujourd'hui sur le marché, d'être certifiés pour embarquer 100 % de carburants d'aviation durables (CAD) (au lieu de 50 % pour les avions actuels).

En fonction des scénarios, ces nouvelles générations d'avions apparaissent plus ou moins vite, et sont associées à des gains différents en termes d'efficacité énergétique.

En effet, dans le **scénario A « Rupture Technologique »**, des investissements très importants dans la recherche et le développement de nouveaux appareils permettent leur commercialisation dès 2035, et ces appareils sont associés à des innovations de rupture et donc à des gains très optimistes en termes d'efficacité énergétique. Ils sont ainsi 30 % plus efficaces que les meilleurs appareils disponibles actuellement sur le marché, ce qui correspond aux prévisions les plus ambitieuses des gains possibles selon les constructeurs (notamment le GIFAS [197][98]).

Dans le **scénario C « Tous leviers »**, des investissements importants mais moins significatifs que dans le scénario A dans la construction aéronautique permettent la commercialisation des nouvelles générations d'avions à la même date que dans ce scénario. Les nouveaux modèles sont cependant moins associés à des innovations de rupture, ce qui les rend moins efficaces que dans le scénario A (25 % de gains par

<sup>63</sup> Pax = passagers.



rapport aux avions les plus efficaces aujourd'hui<sup>64</sup>, ce qui correspond aux gains constatés entre les différentes générations passées mais est optimiste au vu des marges de progrès actuelles du secteur [15]).

Dans le **scénario B « Modération du trafic »**, des investissements plus limités que dans les deux premiers scénarios de transition aboutissent à la commercialisation en 2040 d'avions 20 % plus efficaces que les avions actuels, ce qui correspond à la fourchette basse des prévisions actuelles [98].

#### 4.4.3.2. Commercialisation d'avions court-courrier à propulsion hydrogène

##### 4.4.3.2.1. Des avions court-courriers à propulsion à hydrogène dans les scénarios A et C

Dans les **scénarios A** et **C**, les investissements dans la recherche se portent également sur le développement d'avions court-courriers (CC) à propulsion à hydrogène (à partir d'hydrogène liquide)<sup>65</sup>. Ces avions sont commercialisés à partir de 2035 dans le **scénario A**, ce qui correspond à la date la plus optimiste avancée par Airbus aujourd'hui [207], et en 2040 dans le **scénario C** (ce qui correspond au scénario « Iceman » du rapport « Pouvoir voler en 2050 » [15]). Ces nouveaux avions embarquent une masse supplémentaire d'équipement et un volume plus important de carburant, et sont donc moins efficaces énergétiquement que les nouveaux modèles d'avions CC à kérosène. Les gains en termes d'efficacité énergétique associés à ces nouveaux avions sont ainsi respectivement de 20 % (**scénario A**) et de 15% (**scénario C**) par rapport aux avions les plus performants aujourd'hui sur le marché<sup>66</sup>.

##### 4.4.3.2.2. Des commuturs et des avions régionaux à propulsion à hydrogène dans tous les scénarios de transition

Dans tous les scénarios de transition, des nouvelles générations de commuturs (d'avions assurant des vols de moins de 500 km) et d'avions régionaux (vols de moins de 1000km) apparaissent (Figure 68). Ces avions fonctionnent dans un premier temps toujours au kérosène mais sont plus efficaces que les générations précédentes. Dans un second temps, c'est-à-dire en 2030 pour les **scénarios A** et **C** et en 2035 pour le **scénario B**, les nouveaux commuturs deviennent à propulsion à hydrogène. Dans un troisième temps, ce sont les nouveaux modèles avions régionaux qui recourent à cette énergie alternative<sup>67</sup>.

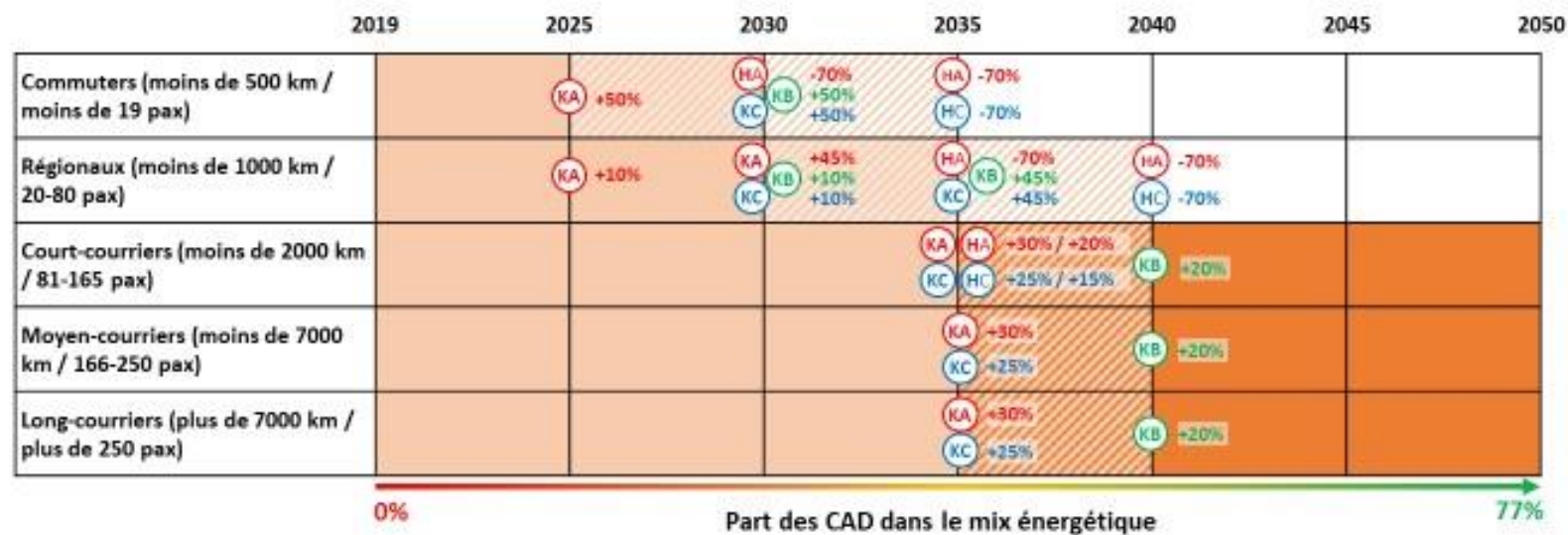
<sup>64</sup> Ce qui correspond aux prévisions de la feuille de route affichée par l'appel d'offres européen SRIA (*Strategic research and innovation agenda*) "The proposed European Partnership for Clean Aviation" dans le cadre Horizon 2020 [15].

<sup>65</sup> Pour rappel, l'hydrogène n'est pertinent que pour les vols de très courte distance, régionaux et court et moyen-courriers. Nous supposons dans tous les scénarios qu'embarquer suffisamment d'hydrogène liquide pour parcourir des distances supérieures à 2000 km (dans des vols moyen-courriers donc) n'est pas pertinent pour des questions de contraintes techniques liées au volume de carburants qu'il faudrait pouvoir embarquer (du fait de la plus faible masse volumique de l'hydrogène liquide).

<sup>66</sup> Le gain de 15% étant tiré du rapport « Pouvoir voler en 2050 » [15], et le 20% étant une hypothèse plus optimiste tirée de la première.

<sup>67</sup> Les dates et les progrès d'efficacité choisis sont cohérents avec le rapport « Pouvoir voler en 2050 » [15] et les hypothèses prises pour les avions CMC et LC.

### Dates de commercialisation des nouvelles générations d'avions dans les différents scénarios de transition



Nouvelle génération d'avions	
(KX)	A kérosène dans le scénario X
(HX)	A hydrogène dans le scénario X
(KX)	Dans le scénario A
(KX)	Dans le scénario B
(KX)	Dans le scénario C

Taux d'incorporation max. de CAD
0%
0% (SA) et 25% (SB et SC)
25%
25% (SA) et 50% (SB et SC)
50%
50% (SB) et 100% (SA et SC)
100%

+X%	Gains d'efficacité énergétique par rapport à la génération précédente d'avions
-Y%	Pertes d'efficacité énergétique par rapport à la génération précédente d'avions

Figure 68 : Dates de commercialisation des nouvelles générations d'avions dans les différents scénarios de transition (Source : I Care)

#### 4.4.3.3. Rythme de renouvellement des flottes

Dans les **scénarios 0** et **B**, le rythme de renouvellement des flottes est similaire au rythme actuel. Ainsi, la flotte aérienne mondiale est entièrement renouvelée au bout de 25 ans. Par conséquent, 4 % des avions les moins efficaces sont renouvelés chaque année dans ces scénarios, et ce comme dans le rapport « Pouvoir voler en 2050 » [15].

Dans les **scénarios A** et **C**, les compagnies aériennes augmentent leurs investissements pour accélérer le rythme de renouvellement des flottes. Ceux-ci passent de 25 ans à 22,5 ans dans le **scénario C**, comme dans le rapport « Destination 2050 » [197]. Le rythme de renouvellement des flottes est encore plus ambitieux dans le **scénario A**, où les flottes sont renouvelées tous les 20 ans.

Au moment de la commercialisation des avions à hydrogène, il est enfin fait l'hypothèse que les compagnies aériennes commercialisent également une nouvelle génération d'appareils CMC à kérosène (notamment pour assurer les vols moyen-courriers impossibles à assurer avec de l'hydrogène bas-carbone, voir Partie 4.4.2.4). Dans tous les scénarios, il est fait l'hypothèse que 50 % des nouveaux appareils court-courriers acquis par les compagnies aériennes sont des avions à propulsion à hydrogène au moment de leur apparition. Cette proportion augmente ensuite progressivement pour atteindre 100 % en 2050. A cette date, tous les nouveaux avions acquis par les compagnies aériennes sont donc des avions à propulsion à hydrogène.

#### 4.4.3.4. Amélioration des opérations

Dans tous les scénarios, des progrès incrémentaux sont réalisés sur les opérations en vol et au sol entre 2020 et 2050, ce qui permet d'augmenter leurs efficacités et donc les émissions de CO<sub>2</sub> du secteur aérien. Les gains d'émissions annuels associés à l'amélioration des opérations dans les différents scénarios sont issus des différentes projections des **scénarios de transition** aujourd'hui disponibles (Partie 4.1). Dans le scénario de référence, les opérations s'améliorent peu, ce qui permet des réductions d'émissions d'environ -3 % d'émissions de CO<sub>2</sub> en 2050 par rapport à 2019. Ces réductions sont de -6 % en 2050 pour les **scénarios B** et **C** pour lesquels les opérations s'améliorent de manière importante, et de -10 % pour le **scénario A** pour lequel les opérations sont pleinement optimisées pour réduire les émissions de CO<sub>2</sub>. Comme les progrès sur les opérations sont incrémentaux, les réductions d'émissions sont réparties de manière équitable dans le temps entre 2020 et 2050.

#### 4.4.4. Amélioration des taux de remplissage des appareils

Pour rappel, le remplissage des avions au départ et à l'arrivée de la France est aujourd'hui déjà optimisé. Ainsi, les vols intérieurs étaient en moyenne remplis à 85 % en 2019 pour la France [87], et il est estimé dans les scénarios que cette valeur était de 82 % à la même date pour les vols internationaux.

Néanmoins, le remplissage des avions peut encore être amélioré. Dans tous les scénarios, les taux de remplissage des vols augmentent ainsi de manière linéaire entre 2019 et 2030. Pour les **scénarios de référence** et **A**, ces taux atteignent 89 % en 2030, et ce aussi bien pour les vols intérieurs que les vols internationaux, ce qui correspond à l'évolution tendancielle des taux de remplissage. Dans les **scénarios B** et **C**, des efforts supplémentaires sont faits, ce qui permet d'atteindre des taux de remplissage de 92 % (**scénario B**) et de 90 % (**scénario C**) en 2030 pour tous les vols<sup>68</sup>. Ces valeurs sont ensuite maintenues constantes entre 2030 et 2050.

Dans tous les scénarios, les capacités d'emport des avions restent constantes à leur niveau de 2019.

#### 4.4.5. Report modal et modération du trafic

Les différents scénarios d'évolution de la quantité de trafic sont élaborés en deux temps. Tout d'abord, des premiers scénarios de trafic, intitulés « hors effet prix », sont élaborés grâce à des hypothèses sur la mise en place de mesures de report modal ou de réduction (absolue ou relative) du trafic. Dans un second temps, les baisses de niveau de trafic associées à la hausse des prix des billets (consécutive à la modernisation des flottes aériennes et au recours aux CAD) sont appliquées aux premiers scénarios pour obtenir les scénarios finaux d'évolution de la quantité de trafic. Ces scénarios sont intitulés « avec effets prix ».

##### 4.4.5.1. Evolution du trafic dans les scénarios (hors effets prix)

<sup>68</sup> Ces valeurs sont issues du rapport « Aviation et climat » de l'Isae-Supaéro [98].

Dans le scénario de référence, les leviers de la réduction et de la modération du trafic et celui du report modal ne sont pas mobilisés. Par conséquent, le trafic reprend entre 2022 et 2024 selon le scénario central des prévisions d’Eurocontrol disponibles en mai 2021 (Figure 69) [208], puis augmente entre 2024 et 2050 selon les hypothèses fournies par la DGAC en novembre 2021 (Tableau 18).

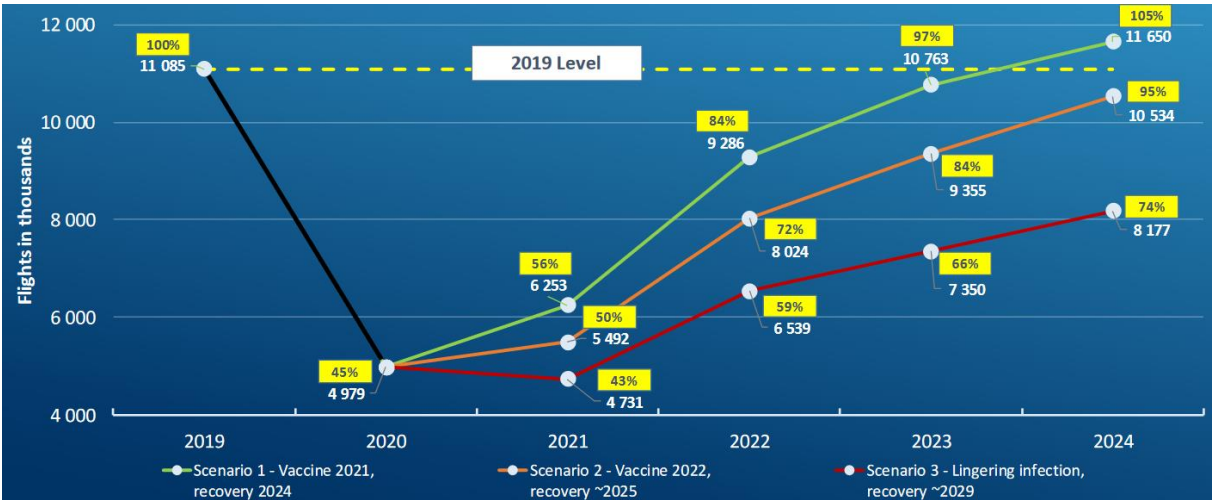


Figure 69 : Prévisions de reprise du trafic suite à la crise sanitaire utilisées dans les scénarios[208]

Tableau 18 : Hypothèses fournies par la DGAC en novembre 2021

	Vols intérieurs Métropole-Métropole	Autres vols intérieurs et vols internationaux
Taux annuel de croissance du trafic de référence 2024 - 2030	+0,9 %	+2,7 %
Taux annuel de croissance du trafic de référence 2031-2040	+1,4 %	+2,7 %
Taux annuel de croissance du trafic de référence 2040-2050	+1,4 %	+2,7 %

Dans le **scénario de référence**, ainsi que dans tous les scénarios, le trafic baisse par ailleurs en 2021 suite à l’adoption de la loi « Climat et Résilience » [119], qui interdit toutes les liaisons intérieures quand il existe une alternative ferroviaire d’une durée de moins de 2h30. Cette loi permet ainsi selon les hypothèses fournies par la DGAC en novembre 2021 de faire baisser le trafic intérieur de -2,3 % en 2021<sup>69</sup>.

Le **scénario A** est un scénario qui mobilise les leviers technologiques de décarbonation du secteur aérien (notamment l’amélioration de l’efficacité énergétique des flottes et la baisse de l’intensité carbone du mix énergétique utilisé par les avions) pour faire baisser les émissions du secteur, sans intervenir sur la quantité de trafic aérien. Par conséquent, le trafic dans le scénario A connaît la même évolution que dans le scénario de référence.

Les deux autres scénarios mobilisent les leviers de la réduction et de la modération du trafic et celui du report modal. Il s’agit ainsi des principaux leviers mobilisés par le **scénario B**. Les actions de réduction et de modération du trafic aérien ainsi que celles d’encouragement du report modal ont pour effet de baisser de manière importante les taux annuels de croissance tendancielle du trafic dans le **scénario B**, et de manière beaucoup plus mesurée dans le **scénario C** (Tableau 19).

<sup>69</sup> A noter que selon des estimations plus récentes, l’article 145 de la loi Climat et Résilience ne permettrait de faire baisser les émissions liées au trafic intérieur (métropolitain et Métropole-Outre-mer) que de 55 000 tonnes de CO<sub>2</sub> [209], soit seulement de 1,1 %.

Tableau 19 : Effets annuels des mesures de réduction et de modération du trafic et d'encouragement du report modal sur la croissance annuelle tendancielle du trafic

	SB	SC
2023-2030 – Vols CMC	-5,0 %	-1,0 %
2023-2030 – Vols LC	-4,0 %	-1,0 %
2031-2040 – Vols CMC	-2,5 %	-1,0 %
2031-2040 – Vols LC	-2,0 %	-1,0 %
2041-2050 – Vols CMC	-1,0 %	-1,0 %
2041-2050 – Vols LC	-1,0 %	-1,0 %

Dans le **scénario B**, qui vise une réduction nette des émissions de CO<sub>2</sub> du secteur aérien entre 2019 et 2030 et qui mobilise pour ce faire le seul levier de décarbonation à haut potentiel disponible aujourd'hui, c'est-à-dire celui de la réduction et de la modération du niveau de trafic (ainsi que dans une moindre mesure celui du report modal) :

- Le trafic des vols intérieurs métropolitains diminue fortement entre 2024 et 2030, puis continue à diminuer de manière plus mesurée entre 2031 et 2040, avant d'augmenter légèrement entre 2041 et 2050 ;
- Le trafic des autres vols (les vols intérieurs en lien avec l'Outre-mer ou les vols internationaux) diminue entre 2024 et 2030, puis réaugmente de manière mesurée entre 2031 et 2040, avant d'augmenter plus fortement entre 2041 et 2050 (Tableau 20).

Tableau 20 : Taux annuels de croissance du trafic aérien dans le scénario B "Modération du trafic"

	Vols intérieurs Métropole-Métropole	Autres vols intérieurs et vols internationaux
Taux annuel de croissance du trafic de référence 2023	-4,1 % / -3,1 % par rapport aux prévisions d'Eurocontrol [208]	
Taux annuel de croissance du trafic de référence 2024 – 2030 vols CMC / LC	-4,1 % / -3,1 %	-2,3 % / -1,3 %
Taux annuel de croissance du trafic de référence 2031-2040 vols CMC / LC	-1,1 % / -0,6 %	+0,2 % / +0,7 %
Taux annuel de croissance du trafic de référence 2040-2050 vols CMC / LC	+0,4 %	+1,7 %

Dans le **scénario C**, le trafic associé aux vols intérieurs stagne entre 2024 et 2030 puis augmente très légèrement entre 2031 et 2050, et celui associé aux autres vols augmente de manière plus mesurée que dans le **scénario de référence** et le **scénario A** entre 2024 et 2050 (Tableau 21).

Tableau 21 : Taux annuels de croissance du trafic aérien dans le scénario C "Tous leviers"

	Vols intérieurs Métropole-Métropole	Autres vols intérieurs et vols internationaux
Taux annuel de croissance du trafic de référence 2023	-1,0 % par rapport aux prévisions d'Eurocontrol [208]	
Taux annuel de croissance du trafic de référence 2024 - 2030	-0,1 %	+1,7 %
Taux annuel de croissance du trafic de référence 2031-2040	+0,4 %	+1,7 %
Taux annuel de croissance du trafic de référence 2040-2050	+0,4 %	+1,7 %

Par conséquent, le trafic :

- Dans le scénario de référence et le **scénario A** : augmente de manière continue entre 2022 et 2050 pour quasiment finir par doubler entre 2019 et 2050 ;
- Dans le **scénario B** : augmente légèrement entre 2022 et 2024, baisse légèrement entre 2024 et 2030, réaugmente légèrement entre 2031 et 2040 pour retrouver son niveau de 2024 à cette



échéance, et augmente enfin de manière plus importante entre 2041 et 2050. A cette date, le trafic est légèrement supérieur à son niveau de 2019 ;

- Dans le **scénario C** : augmente de manière continue mais plus modérée que dans le scénario A entre 2024 et 2050, pour aboutir à un niveau environ 1,5 fois plus élevé en 2050 qu'en 2019 (Figure 70).

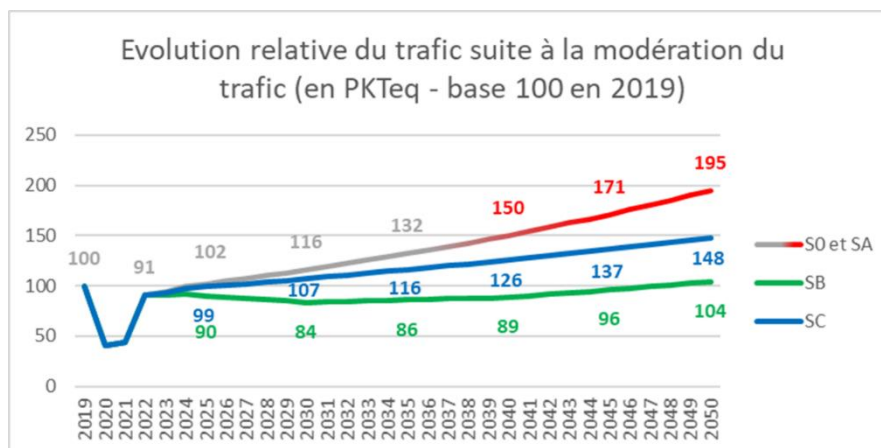


Figure 70 : Evolution relative du trafic suite à la modération du trafic (en PKTeq - base 100 en 2019 - sans effets prix)

#### 4.4.5.2. Un trafic qui est impacté par la hausse du prix du mix énergétique associée aux consommations de CAD et d'hydrogène par les avions

Dans tous les **scénarios de transition**, le levier de la baisse de l'intensité carbone du mix énergétique est mobilisé pour réduire les émissions de CO<sub>2</sub> du secteur aérien. Ainsi, dans tous les scénarios, les CAD (et l'hydrogène dans les **scénarios A** et **C**) se substituent progressivement au kérosène. Cependant, les CAD et l'hydrogène bas-carbone sont plus chers à produire que le kérosène.

Les biocarburants sont ainsi aujourd'hui en moyenne 4 fois plus cher que le kérosène<sup>70</sup>. Les prix des électrocarburants et de l'hydrogène, qui sont produits par électrolyse dans les scénarios, seront également bien supérieurs au prix du kérosène au démarrage de leur production industrielle. Dans tous les **scénarios de transition**, les coûts de production des CAD et de l'hydrogène bas-carbone baissent entre 2020 ou 2030 et 2050, grâce aux économies d'échelle permises par la structuration des filières de production ainsi qu'aux progrès technologiques. L'ampleur de ces baisses des coûts de production est aujourd'hui très incertaine. Néanmoins, les CAD et l'hydrogène bas-carbone sont toujours plus chers à produire que le kérosène en 2050 selon les projections actuellement disponibles (voir notamment [197] [199] et [167]).

Le prix moyen du mix énergétique augmente donc dans tous les scénarios de transition au fur et à mesure que les CAD et l'hydrogène bas-carbone remplacent le kérosène. Dans les **scénarios de transition**, les coûts de production du kérosène, des CAD et de l'hydrogène bas-carbone évoluent de la même manière que dans le scénario « Destination 2050 » (Figure 71) [197]. Ainsi, les coûts de production du kérosène augmentent de +37 % entre 2020 et 2050.

<sup>70</sup> A noter que cette valeur constitue un ordre de grandeur, et que ce rapport peut évoluer en fonction des conjonctures économiques et politiques, comme c'est le cas en 2022 avec la forte hausse des coûts du pétrole suite à la guerre en Ukraine.

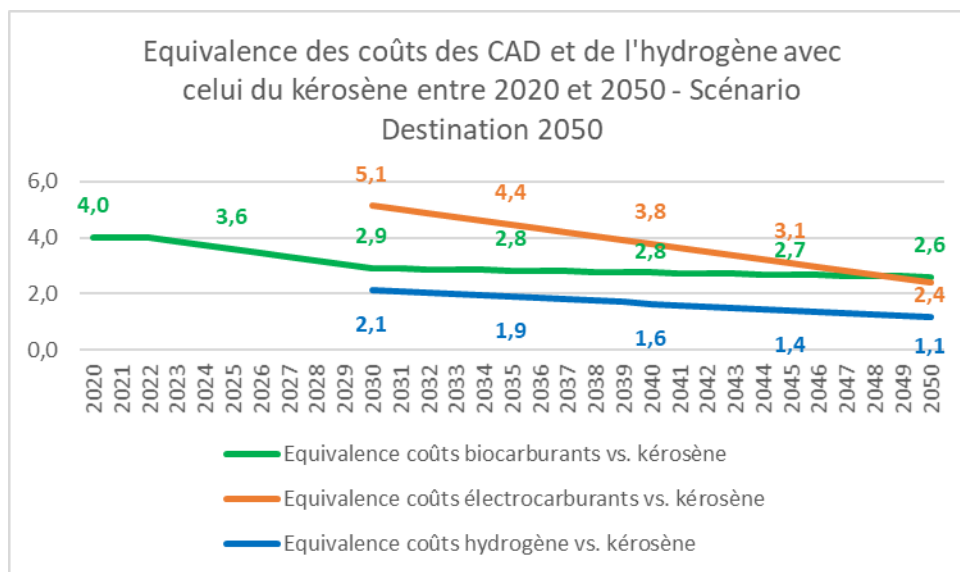


Figure 71 : Equivalence des coûts des CAD et de l'hydrogène avec celui du kérosène entre 2020 et 2050 - Scénario Destination 2050<sup>71</sup>[197]

Par ailleurs, les nouvelles générations d'avions seront plus chères du fait du recours à des technologies de rupture pour atteindre des gains significatifs en termes d'efficacité énergétique (et ce notamment dans les **scénarios A** et **C**). De la même manière que pour les CAD et l'hydrogène bas-carbone, la hausse des coûts de renouvellement des flottes des compagnies aériennes reste encore très incertaine, et est à mettre en regard des futures économies de carburants réalisées grâce aux avions plus efficaces.

Les impacts financiers de la modernisation des flottes et de la baisse de l'intensité carbone du mix de carburants sur les dépenses d'opération des compagnies aériennes sont donc encore très incertains. Ils dépendent pour beaucoup des économies d'échelle qui seront réalisées par les différentes filières de production. L'importance de la hausse des coûts des transports dépendra également des subventions publiques accordées aux différentes filières.

Les compagnies aériennes ayant des marges faibles, la hausse des coûts de transport devrait se répercuter sur les prix des billets. Ces prix augmentent donc dans tous les scénarios entre 2020 et 2050.

**Enseignement n°2 :** La modernisation des flottes et la baisse de l'intensité carbone du mix de carburants auront pour effet de diminuer la demande de trafic (« effet prix »). L'amplitude de la baisse de trafic associée à ces deux leviers est encore très incertaine.

Dans les **scénarios de transition**, il est fait l'hypothèse que l'impact financier de la modernisation des flottes sur les dépenses opérationnelles des compagnies aériennes est intégralement compensé par les économies de carburant permises par l'amélioration de l'efficacité de ces mêmes flottes (et ce comme dans le rapport « Destination 2050 » [197]). Ainsi, la hausse des coûts de transport est uniquement due à l'augmentation du prix du mix énergétique, qui évolue en fonction de l'évolution de la composition de celui-ci (Tableau 16) et de l'évolution des coûts des différents types de carburants (Figure 71). L'amplitude de cette hausse des coûts de transport est calculée en utilisant comme point de départ la part des dépenses en carburants des compagnies aériennes dans leur dépenses totales d'opération en 2019, c'est-à-dire 24 % [210]

Cette hausse du coût du transport est intégralement reportée sur les prix des billets, puisqu'il est fait l'hypothèse qu'aucune subvention publique n'est accordée au secteur aérien pour l'atténuer. L'impact de la hausse des prix des billets sur la demande est enfin évalué grâce aux élasticités-prix incluses dans le Tableau 22 ci-dessous.

<sup>71</sup> Cette figure se lit de la manière suivante : 1 tonne de biocarburants coûte respectivement 4,0 fois et 2,6 fois plus cher en 2020 et en 2050 qu'une tonne de kérosène.

Tableau 22 : Elasticités du trafic par rapport au prix par type de vols [211]<sup>72</sup>

Elasticité du trafic par rapport au prix	
Vols intérieurs court-courriers	-1,23
Vols internationaux court-courriers	-1,12
Vols moyen et long-courriers	-1,12

Comme précisé précédemment, la « compensation » n'est pas un des leviers de décarbonation utilisés pour diminuer les émissions dans les **scénarios de transition**. En effet, cette étude se concentre sur la réduction des émissions directes et indirectes du secteur aérien, et la compensation n'est donc pas incluse dans le périmètre de cette étude.

La compensation d'émissions de GES par le financement de projets de séquestration (qui sont généralement les projets proposés) est confrontée aux limites de temporalité (les émissions liées à l'aérien 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 GES) (voir également Annexe 2) [212] [213] [214]. C'est pourquoi le terme même de « compensation » est contestable.

L'impact sur les prix des billets (et donc sur le trafic) de la compensation des émissions de CO<sub>2</sub> liées aux vols intérieurs métropolitains, rendue obligatoire par la loi « Climat et Résilience » qui précise les vols concernés [119], n'est par conséquent pas pris en compte dans cette étude. L'impact du coût de la compensation volontaire des émissions générées durant les vols par les passagers lors des achats des billets n'est également pas pris en compte<sup>73</sup>, tout comme celui des actions de compensation effectuées par les compagnies aériennes (de manière volontaire ou dans le cadre du mécanisme CORSIA)<sup>74</sup>.

Par ailleurs, l'étude ne modélise pas non plus l'impact sur le prix des billets de l'évolution du prix des quotas d'émissions sur le marché carbone européen, ni de l'extension du périmètre de celui-ci à tous les vols au départ de l'Europe.

Enfin, l'influence de l'inflation n'est pas prise en compte pour calculer l'impact des projections d'évolution des prix des carburants sur les prix des billets et l'impact de la hausse du prix des billets sur la demande de trafic.

#### 4.5. Synthèse des hypothèses simplificatrices retenues précédemment

Les hypothèses exposées précédemment constituent parfois des simplifications de la réalité. Ces simplifications sont nécessaires dans le cadre d'un exercice de modélisation, mais constituent autant d'approximations qu'il convient de garder à l'esprit au moment de considérer les résultats issus des scénarios. Ainsi, les principales simplifications apportées précédemment sont :

- L'impossibilité d'exporter et d'importer biocarburants, électrocarburants et hydrogène bas-carbone, ainsi que son corollaire, c'est-à-dire l'impossibilité d'incorporer des CAD dans les vols en provenance de régions autres que la France Métropolitaine, l'Europe (au sens de la Figure 65) et l'Amérique Centrale et du Sud ;
- L'impossibilité d'intégrer de l'hydrogène dans les vols moyen-courriers ;
- Des capacités d'emports de passagers par type de vol (court, moyen et long-courriers) qui restent constantes dans le temps ;
- Une répartition du trafic par type de vols (court, moyen et long-courriers) supposée constante dans le temps ;

<sup>72</sup> Ce tableau se lit de la manière suivante : une augmentation de 3,00% du prix du billet des vols intérieurs court-courrier entraîne une diminution de la demande de transport aérien d'environ  $-1,23 \times 3,00\% = -3,69\%$ . Les deux sont donc étroitement corrélés.

<sup>73</sup> A noter que cette forme de compensation peut avoir un effet pervers en effaçant « le sentiment d'inconfort du fait d'être responsable d'émissions » [213] que peuvent éprouver certains passagers aériens, et donc s'apparenter à un « droit à polluer ». Cette autorisation peut inciter ces mêmes passagers à compenser systématiquement leurs émissions au lieu de les réduire, et donc conduire à une augmentation des émissions brutes du secteur aérien, émissions qui ne sauraient être contrebalancées exactement par des projets de compensation (voir Annexe 2).

<sup>74</sup> A noter que les effets prix associés à ces opérations de compensation (volontaires ou réglementaires) sont inférieur d'un ordre de grandeur par rapport aux effets prix associés à l'amélioration de l'efficacité énergétique des flottes et à la baisse de l'intensité carbone du mix énergétique (Partie 5.1.2.5.2).

- Une répartition du trafic par origine-destination qui reste constante dans le temps (les vols en provenance et au départ de l'Afrique vers ou depuis la France représentent par exemple toujours la même part des vols au départ et à l'arrivée de la France entre 2019 et 2050) ;
- Des élasticités prix considérées comme constantes dans le temps ;
- Pas d'impact de l'inflation sur la période.

## 5. ANALYSE DES IMPACTS DES SCENARIOS DE TRANSITION

### 5.1. Une évaluation des émissions de CO<sub>2</sub> de 2020 à 2050 réalisée grâce à un modèle développé spécifiquement pour les besoins de l'étude

#### 5.1.1. Description du modèle utilisé

Le modèle utilisé dans le cadre de cette étude a été librement adapté de l'outil de calcul élaboré par Supaéro Décarbo et le Shift Project dans le cadre du rapport "Pouvoir Voler en 2050" [15].

##### 5.1.1.1. Périmètre des émissions de CO<sub>2</sub> couvertes par le modèle

Les émissions comptabilisées dans le cadre de cette étude sont celles liées aux vols commerciaux de passagers et de fret. Comme évoqué dans la Partie 1.3, les émissions liées aux vols militaires et privés sont donc exclues de la modélisation réalisée. Par ailleurs, les vols commerciaux considérés sont soit tous les vols au départ et à l'arrivée de la France (Périmètre « Départs et arrivées France »), soit tous les vols au départ de la France (Périmètre « Départs France ») (Tableau 1). Pour tous les vols commerciaux considérés, les émissions prises en comptes sont celles liées :

- A la production et la distribution des carburants consommés par les avions ;
- A l'utilisation des Groupes auxiliaires de puissance (APU), qui est « un petit turboréacteur embarqué, situé en général à l'arrière du fuselage, qui permet à l'avion d'être autonome en escale pour l'air (compresseur haute pression) et l'électricité » [24] ;
- Aux phases d'approche, d'atterrissage, de roulage, de décollage et de montée des avions (phases LTO pour Landing and Take Off) ;
- A la phase de croisière pour le périmètre « Départs France », ou aux demi-croisières pour le périmètre « Départs et arrivées France ». Dans ce dernier, seule la moitié des émissions liées aux phases de vol des avions est prise en compte (Tableau 1).

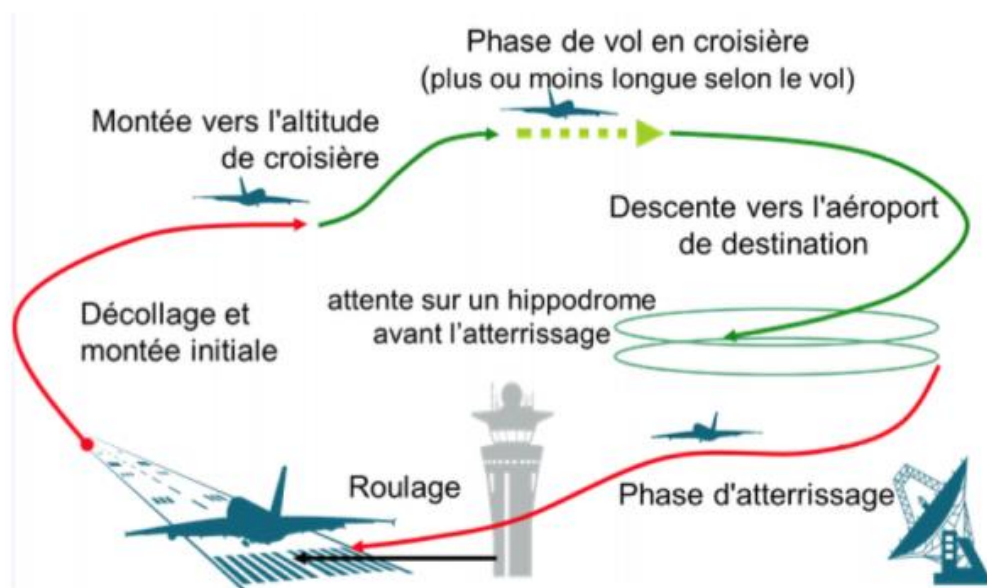


Figure 72 : Schéma des différentes phases d'un cycle LTO [215]

Les émissions liées aux activités suivantes sont donc exclues de la modélisation :

- Cycle de vie de l'avion (extraction des matériaux, fin de vie...);
- Construction des infrastructures (aéroports...)
- Fonctionnement des équipements de soutien au sol (GSE);
- Trajets vers et depuis les aéroports ;
- Exploitation des aéroports.

Le modèle se base sur les émissions historiques de CO<sub>2</sub> du secteur entre 2015 et 2019 [6], puis permet de calculer leur évolution entre 2019 et 2050 en fonction d'une série d'hypothèses et de paramètres d'entrée.



### 5.1.1.2. Principe général de fonctionnement

Le fonctionnement du modèle est présenté de manière succincte dans la Figure 73 ci-dessous. Le détail des hypothèses de chaque scénario est disponible dans le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

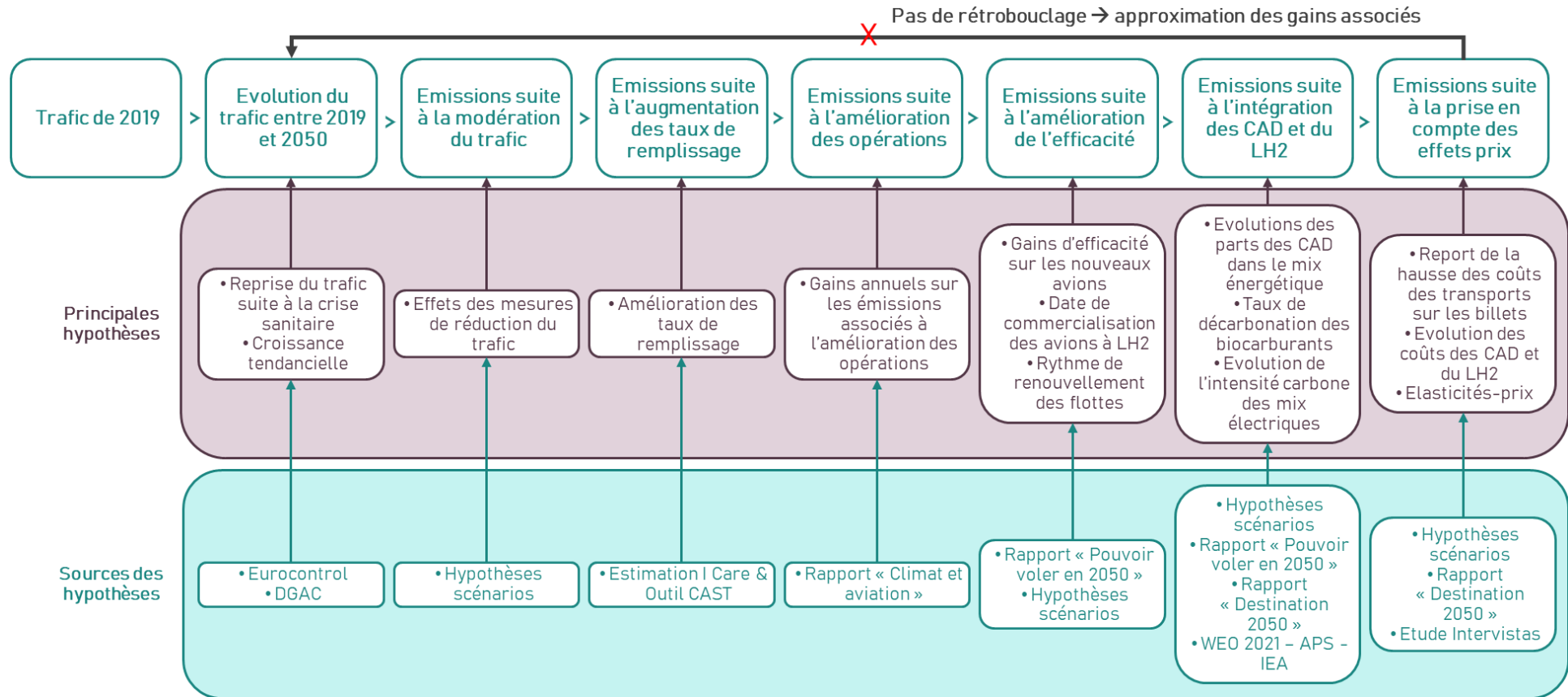


Figure 73 : Représentation succincte du fonctionnement du modèle développé dans le cadre de l'étude (Source : I Care)

### 5.1.1.3. Partis-pris méthodologiques et limites

Comme tout modèle, celui développé dans le cadre de l'étude est une représentation imparfaite de la réalité. Ainsi, il repose sur un certain nombre d'hypothèses simplificatrices qui sont synthétisées dans la Partie 4.5. Par ailleurs, comme cela est visible sur la Figure 73, le modèle ne repose pas sur un système d'équations d'équilibre général, et ne permet donc pas un rétrobouclage complet sur les effets prix. Ainsi, les effets prix calculés dans le cadre des scénarios de transition sont des approximations.

Le modèle comporte par ailleurs les limites suivantes :

- Les appareils liés au trafic en provenance et à destination de la France restent liés à celui-ci durant toute leur durée de vie. Un nouvel appareil acquis par une compagnie pour assurer un vol en provenance ou à destination de la France assurera donc ce vol durant toute sa durée de vie, et donc une durée entre 20 et 25 ans en fonction du scénario considéré. A titre d'exemple, la flotte d'Air France avait un âge moyen de l'ordre de 12 ans pour Air France KLM au 30 décembre 2020 [178]. L'âge moyen des avions des flottes de compagnies européennes similaires était de l'ordre de 11 ans, celui des avions des flottes des compagnies du Golfe et des compagnies asiatiques de l'ordre de 6 ans [15]. D'ici à 2050, les flottes des compagnies opérant des liaisons en France ou avec la France pourraient être renouvelées plus rapidement, soit en avançant la fin de vie des appareils, soit en revendant les appareils les plus anciens à d'autres compagnies opérant sur d'autres continents (même si ces appareils peuvent continuer à assurer des liaisons avec la France depuis leur nouveau pays d'attache).
- La mise en œuvre de mécanismes de compensation et/ou de captage et de stockage du carbone ne sont pas modélisés. En effet, l'étude se focalise ici sur la réduction des émissions à leur source qui est prioritaire par rapport à la séquestration des émissions résiduelles (de la même manière que dans la SNBC).
- L'étude ne prend pas en considération les impacts que peut avoir le dérèglement climatique sur le secteur, ni sur la capacité à voler des avions (modification de la masse volumique de l'air, des vents dominants ...) ainsi que sur l'organisation actuelle du secteur (la présence d'aéroports aux abords de côtes maritimes et la hausse des niveaux de la mer, l'organisation des pistes d'atterrissage en fonction des vents dominants...).
- L'étude ne comporte pas d'évaluation des investissements nécessaires au développement de nouveaux modèles d'avions, à l'accélération du rythme de renouvellement des flottes, ainsi qu'au développement des capacités nationales de production de CAD et d'hydrogène bas-carbone. Il est certain que des investissements publics seront nécessaires pour accompagner la mobilisation des leviers de l'efficacité énergétique d'une part, et de la baisse de l'intensité carbone du mix énergétique d'autre part ; il est également certain que ces investissements seront significatifs.

### 5.1.2. Réductions d'émissions de CO<sub>2</sub> liées à la mobilisation de chaque levier dans chaque scénario

Comme cela est explicité dans la Figure 73, le modèle calcule tout d'abord la hausse des émissions consécutives à la croissance du trafic tendancielle dans chacun des scénarios, puis calcule les réductions d'émissions associées à la mobilisation des 4 leviers de décarbonation suivant :

- Réduction / Modération du trafic et report modal (Partie 5.1.2.1) ;
- Augmentation du taux de remplissage des avions (Partie 5.1.2.2) ;
- Amélioration des opérations (Partie 5.1.2.3) ;
- Amélioration de l'efficacité énergétique des flottes (Partie 5.1.2.4) ;

A ces réductions d'émissions sont enfin ajoutées celles liées à la baisse de l'intensité carbone des sources d'énergie et aux effets prix associés à celle-ci (Partie 5.1.2.5).

#### 5.1.2.1. La réduction et la modération du trafic permettent de fortes réductions des émissions de CO<sub>2</sub> dans les scénarios B et C

Les émissions de CO<sub>2</sub> baissent très rapidement dans le **scénario B** avant 2030 grâce aux mesures de réduction du trafic<sup>75</sup> mises en place entre 2023 et 2030 (Tableau 20). A partir de 2031, les mesures concernant le trafic dans le **scénario B** sont plus modestes et en conséquence permettent seulement de modérer la croissance de celui-ci (et non plus de le réduire - Tableau 20 et Figure 70), ce qui explique le ralentissement des réductions d'émissions par rapport au **scénario de référence** à partir de cette date-

<sup>75</sup> Pour rappel, l'unité utilisée dans toute cette partie pour les évolutions de trafic est le Passager-équivalent-Kilomètre-Transporté (PKTeq).

là. En 2050, ces efforts ont quasiment permis de faire baisser les émissions de moitié par rapport au **scénario de référence** (Figure 74).

Les réductions d'émissions de CO<sub>2</sub> sont également substantielles mais moins importantes dans le **scénario C**, où les émissions baissent quasiment de -25% par rapport au **scénario de référence** grâce à la modération du trafic qui se fait de manière identique (à taux annuel constant) au cours du temps (Tableau 20 et Figure 74).

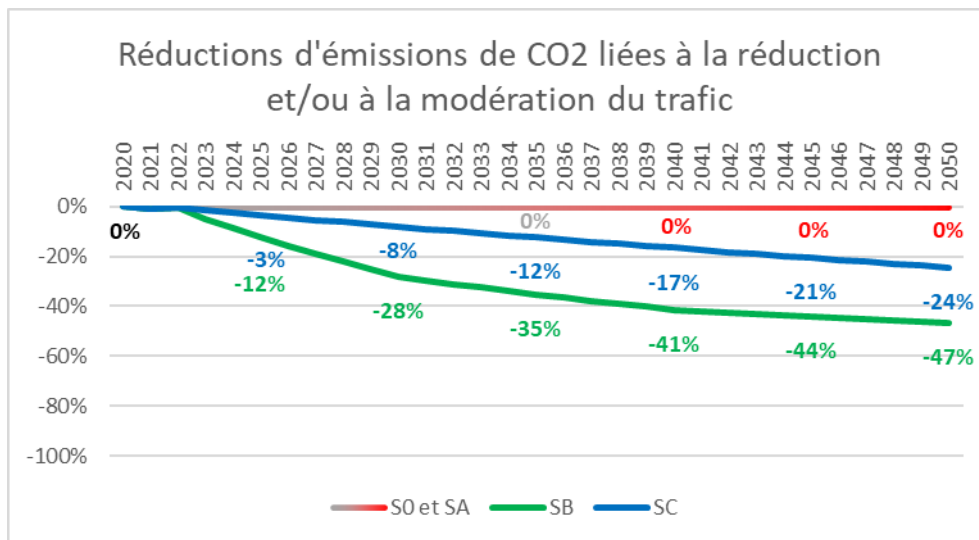


Figure 74 : Réductions d'émissions de CO<sub>2</sub> liés à la réduction et à la modération du trafic par rapport aux émissions du trafic de référence

#### 5.1.2.2. L'amélioration des taux de remplissage aboutit à des réductions des émissions de CO<sub>2</sub> à court terme

L'amélioration des taux de remplissage permet de faire baisser les émissions de CO<sub>2</sub> à court terme entre 2020 et 2030. Les réductions d'émissions de CO<sub>2</sub> s'élèvent au mieux à -11 % (Figure 75). Elles sont plus fortes dans le **scénario B** où les taux de remplissage atteignent en moyenne à 92 % pour l'ensemble des vols en 2030, alors qu'ils s'élèvent « seulement » à 90 % dans le **scénario C** et à 89 % dans les scénarios 0 et **A** (Partie 5.1.2.2).

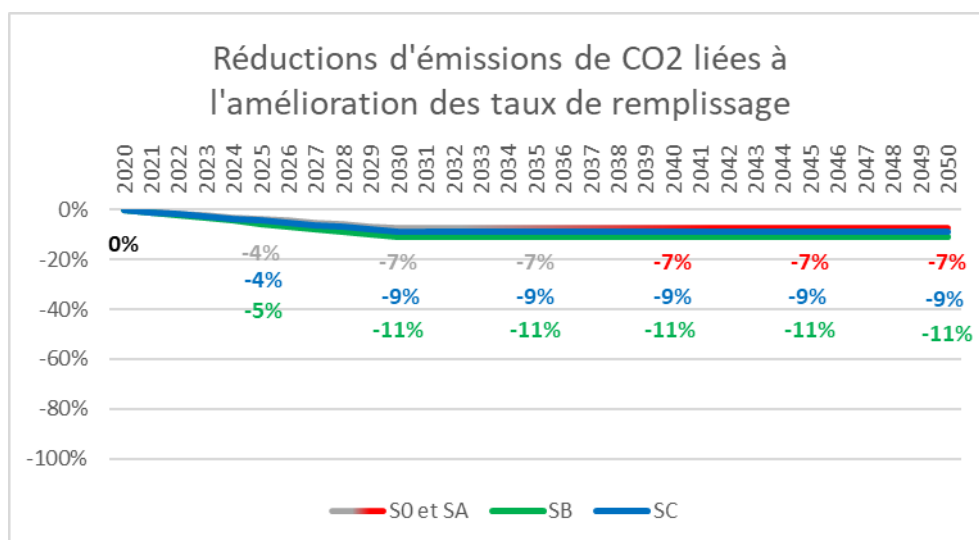


Figure 75 : Réductions d'émissions de CO<sub>2</sub> liées à l'amélioration des taux de remplissage par rapport aux émissions suite à la réduction et à la modération du trafic

#### 5.1.2.3. L'amélioration des opérations en vol et au sol aboutit à des réductions des émissions de CO<sub>2</sub> à long terme

Conformément aux hypothèses des scénarios sur l'amélioration des opérations (Partie 4.4.3.4), celle-ci permet de faire baisser les émissions de CO<sub>2</sub> à long terme. Les réductions d'émissions de CO<sub>2</sub> s'élèvent au mieux à -10 %, et sont contrastées entre les différents scénarios (Figure 76).

Ainsi, si les opérations s'améliorent légèrement par rapport à aujourd'hui dans le **scénario 0** (-3 % de réduction d'émissions en 2050 par rapport à un scénario sans amélioration), les opérations sont plus optimisées dans les **scénarios B et C** (-6 % de réduction d'émissions en 2050), et sont optimisées selon les prévisions les plus optimistes du secteur dans le **scénario A** (-10 % de réduction d'émissions en 2050) (Partie 5.1.2.3).

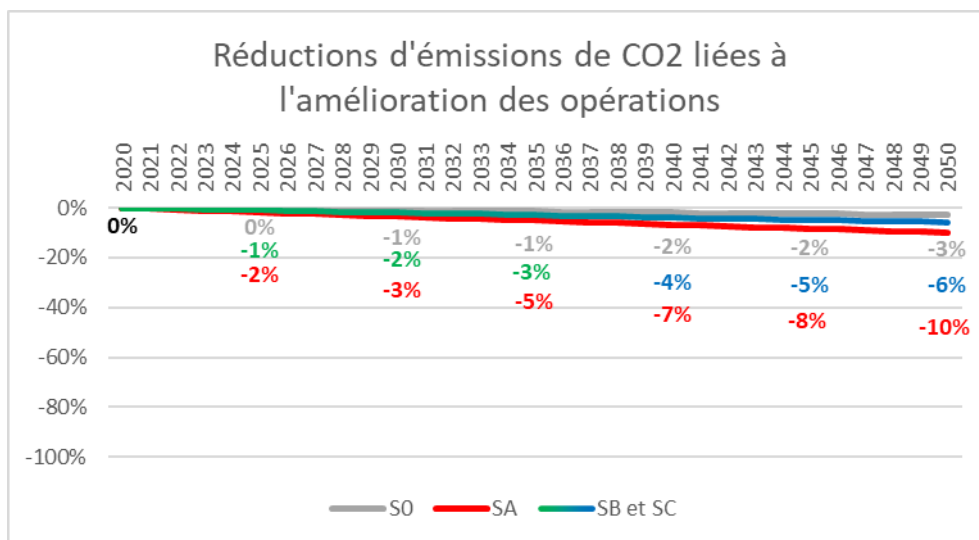


Figure 76 : Réductions d'émissions de CO<sub>2</sub> liées à l'amélioration des opérations par rapport aux émissions liées à l'amélioration des taux de remplissage

#### 5.1.2.4. L'amélioration de l'efficacité énergétique est le deuxième levier qui permet de faire baisser significativement les émissions de CO<sub>2</sub>

Dans tous les **scénarios de transition**, les réductions d'émissions associées à la modernisation des flottes sont progressives mais s'accroissent avec la commercialisation des nouveaux modèles d'avions conventionnels.

Ces réductions sont plus fortes pour les **scénarios A et C** qui mobilisent plus les leviers technologiques que le **scénario B** (Partie 4.4.2). En effet, dans ces deux scénarios, de nouvelles générations d'avions à kérosène sont commercialisées en 2035 (contre 2040 pour le **scénario B**), et ces nouvelles générations sont associées à des progrès techniques plus importants qui permettent des gains en termes d'efficacité très importants dans le **scénario A** (+30 % par rapport à la génération précédente, soit le gain maximum envisagé par les acteurs de la construction aéronautique), et importants dans le **scénario C** (+25 %, à comparer aux +20 % de progrès dans le **scénario B**)<sup>76</sup>. Par ailleurs, dans les **scénarios A et C**, le rythme de renouvellement des flottes est accéléré par rapport au rythme actuel (20 ans (**scénario A**) et 22,5 ans (**scénario C**) contre 25 ans aujourd'hui (**scénario 0** et **scénario B**)).

En 2050, les réductions d'émissions sont significatives dans tous les scénarios, et bien supérieures aux gains du **scénario 0** dans les **scénarios A et C** (Figure 77).

<sup>76</sup> A noter qu'aucune nouvelle génération d'avion n'est commercialisée dans le **scénario 0**, où la flotte est entièrement renouvelée avec les avions les plus modernes disponibles aujourd'hui en 2045, date à partir de laquelle l'efficacité énergétique des flottes ne s'améliore plus (Figure 77).

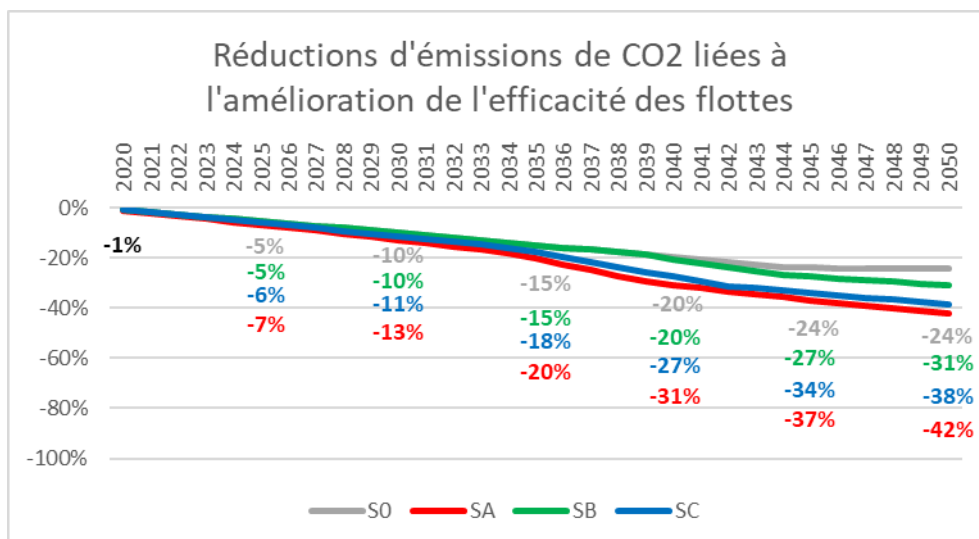


Figure 77 : Réductions d'émissions de CO<sub>2</sub> liées à l'amélioration de l'efficacité des flottes par rapport aux émissions liées à l'amélioration des opérations

### 5.1.2.5. L'utilisation des CAD est le troisième levier qui permet de faire baisser significativement les émissions de CO<sub>2</sub>

#### 5.1.2.5.1. *Un mix énergétique qui se décarbone progressivement dans les différents scénarios de transition*

Dans tous les scénarios de transition, les CAD (ainsi que l'hydrogène bas-carbone dans les scénarios A et C) se substituent progressivement et partiellement au kérosène.

#### Scénario A

Dans le scénario A, l'immense majorité (84%) de l'énergie utilisée en 2050 dans les vols au départ de la France est une énergie alternative (biocarburants, électrocarburants et hydrogène bas-carbone), mais en moyenne, le kérosène représente encore 29% de l'énergie consommée dans les vols au départ et à l'arrivée de la France en 2050 (Figure 78).

En effet, dans ce scénario, 80 % des appareils (en dehors des avions à propulsion hydrogène) sont certifiés en 2050 pour embarquer 100 % de CAD. La capacité maximale d'emport de CAD d'un appareil est donc en moyenne de 90 % en 2050. Les appareils embarquent à cette date-là :

- 28 % de biocarburants et 53 % d'électrocarburants (et donc 19 % de kérosène) s'ils partent des zones géographiques « pertinentes » (France métropolitaine, « Europe », Amérique du Sud – voir Partie 4.4.2.2) ;
- 28 % de biocarburants et 72 % de kérosène sinon.

Les autres appareils, c'est-à-dire les 20 % restant qui sont seulement certifiés pour embarquer 50 % de CAD, embarquent en 2050 :

- 17 % de biocarburants et 33 % d'électrocarburants (et donc 50 % de kérosène) s'ils partent des zones géographiques « pertinentes » ;
- 28 % de biocarburants et 72 % de kérosène sinon.

Par conséquent, les vols au départ de la France embarquent en moyenne plus de CAD que ceux au départ et à l'arrivée de la France, et proportionnellement plus d'électrocarburants (Figure 78).

Les consommations d'hydrogène représentent près de 7 % des consommations dans les vols au départ de la France, notamment du fait du rythme de renouvellement accéléré des flottes qui implique la présence plus importante que dans les autres scénarios d'avions court-courriers à propulsion à hydrogène.



### Composition du mix énergétique en 2050 (en tep) dans le scénario A Avec effets prix

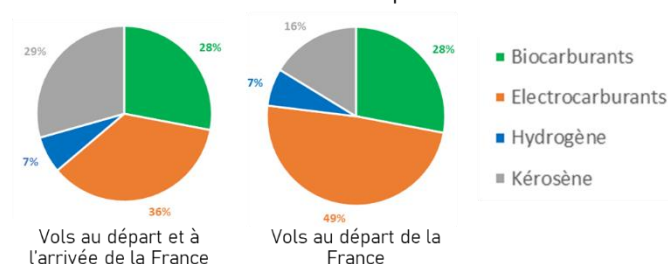


Figure 78 : Composition du mix énergétique en 2050 (en tep) dans le scénario A - Avec effets prix

Pour atteindre ce résultat, le **scénario A** repose sur une augmentation très rapide de la production d'électrocarburants entre 2040 et 2050. Il s'agit de la première énergie utilisée en 2050, et les consommations d'électrocarburants sont supérieures dans ce **scénario** à celles dans les **scénarios B** et **C**. Les consommations de biocarburants augmentent quant à elles essentiellement entre 2030 et 2040 (Figure 79).

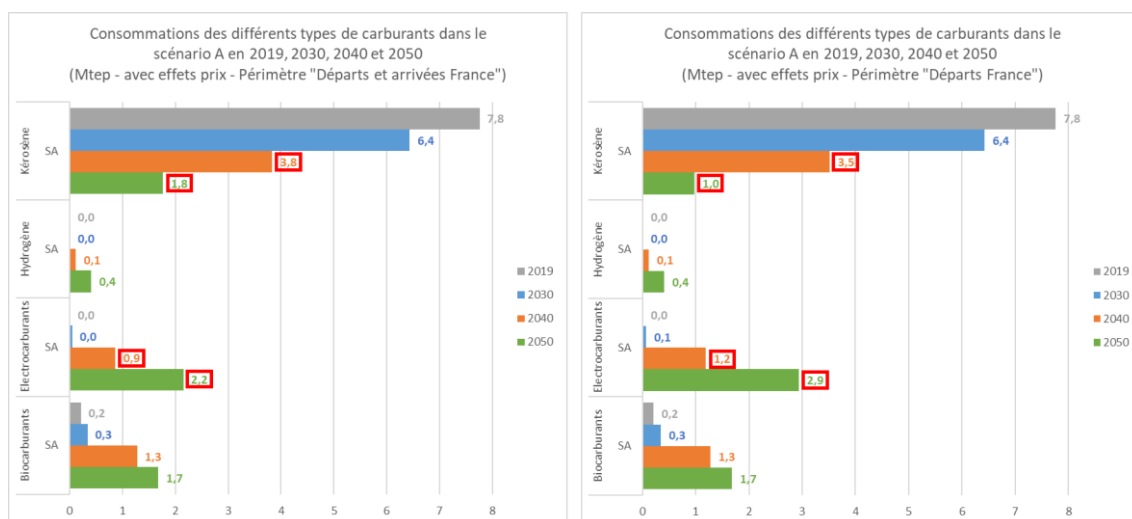


Figure 79 : Consommations des différents types de carburants dans le scénario A en 2019, 2030, 2040 et 2050 (en Mtep – les chiffres en rouge sont ceux qui changent entre les deux graphiques)

### Scénario B

La part de kérosène dans le mix énergétique des vols au départ de la France et de ceux au départ et à l'arrivée de la France est identique dans le **scénario B** en 2050.

Dans ce **scénario**, les avions ne sont certifiés qu'en 2040 pour pouvoir embarquer 100 % de CAD, et les flottes se renouvellent à leur rythme actuel (tous les 25 ans). Par conséquent, la flotte du **scénario B** est encore en majeure partie (à 56 %) composée d'appareils ne pouvant embarquer au maximum que 50 % de CAD en 2050. A cette date, les appareils peuvent donc en moyenne emporter au maximum 78 % de CAD, qui est une valeur moins importante que les mandats d'incorporation indiqués en hypothèses (Tableau 16). Ceux-ci ne sont donc pas respectés dans ce **scénario** pour des raisons techniques. Ainsi, dans le **scénario B** en 2050 :

- Les avions au départ des zones géographiques « pertinentes » (France métropolitaine, « Europe », Amérique du Sud – voir Partie 4.4.2.2) embarquent 50 % de biocarburants et 50 % d'électrocarburants s'ils sont certifiés pour embarquer 100 % de CAD, et 25 % de biocarburants et 25 % d'électrocarburants sinon ;
- Les avions au départ des autres zones géographiques (Outre-mer, Amérique du Nord, Afrique, Asie, Océanie) embarquent 50 % de biocarburants, qu'ils soient certifiés ou non pour embarquer 100 % de CAD.

Par conséquent, les vols au départ de la France embarquent en moyenne la même quantité de CAD que ceux au départ et à l'arrivée de la France, mais proportionnellement plus d'électrocarburants (Figure 80).

### Composition du mix énergétique en 2050 (en tep) dans le scénario B Avec effets prix

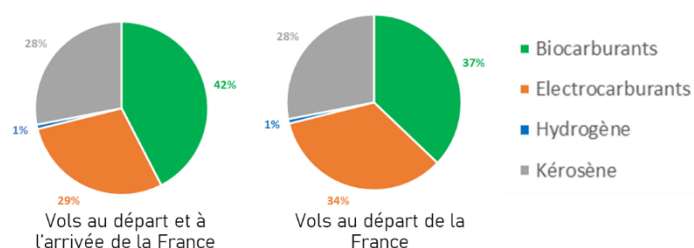


Figure 80 : Composition du mix énergétique en 2050 (en tep) dans le scénario B - Avec effets prix

Dans ce **scénario B**, les consommations d'électrocarburants sont au moins deux fois moins élevées que celles dans le **scénario A**, et les consommations de biocarburants augmentent essentiellement entre 2030 et 2040, mais moins rapidement et moins fort que dans ce **même scénario A**. En 2050, cette énergie alternative est l'énergie la plus consommée dans les vols (Figure 81).

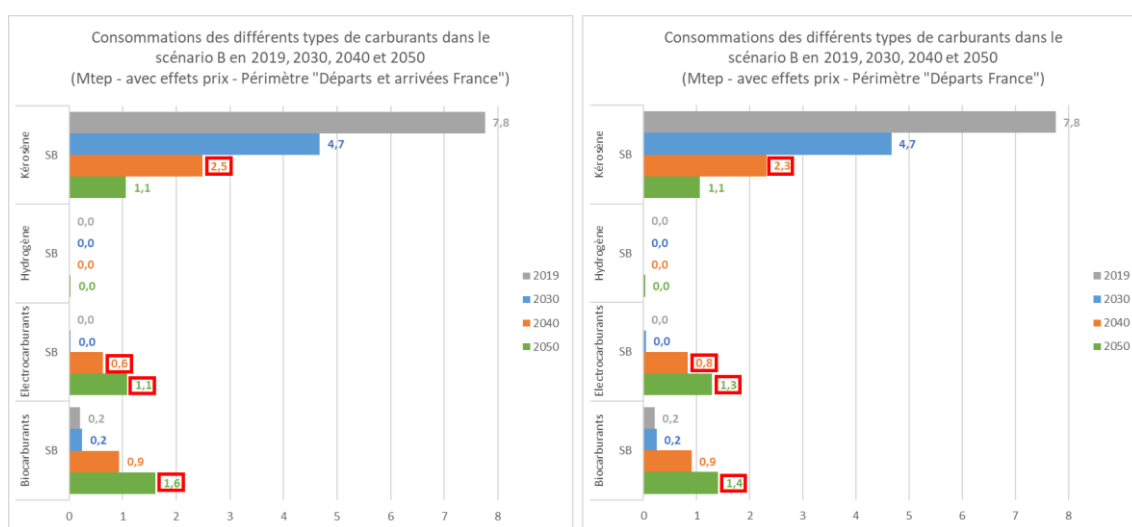


Figure 81 : Consommations des différents types de carburants dans le scénario B en 2019, 2030, 2040 et 2050 (en Mtep – les chiffres en rouge sont ceux qui changent entre les deux graphiques)

### Scénario C

Dans le **scénario C**, le kérosène reste la première énergie utilisée en 2050 du fait :

- Des mandats d'incorporation moins ambitieux que dans les autres scénarios ;
- De l'incapacité de certains vols en provenance de l'étranger à embarquer des électrocarburants ;
- De l'incapacité de 29 % de la flotte aérienne (hors avions court-courriers à propulsion hydrogène) à embarquer plus de 50 % de CAD. En 2050, les appareils peuvent donc en moyenne emporter au maximum 86 % de CAD (Tableau 16). En effet, dans ce **scénario** en 2050 :
  - Les avions au départ des zones géographiques « pertinentes » (France métropolitaine, « Europe », Amérique du Sud – voir Partie 4.4.2.2) embarquent 28 % de biocarburants et 35 % d'électrocarburants s'ils sont certifiés pour embarquer 100 % de CAD, et 22 % de biocarburants et 28 % d'électrocarburants sinon ;
  - Les avions au départ des autres zones géographiques (Outre-mer, Amérique du Nord, Afrique, Asie, Océanie) embarquent 28 % de biocarburants, qu'ils soient certifiés ou non pour embarquer 100 % de CAD.

Ainsi, les vols au départ et à l'arrivée de la France embarquent en moyenne 44 % de kérosène, alors que ceux au départ de la France en embarquent en moyenne 35 % (Figure 82).

### Composition du mix énergétique en 2050 (en tep) dans le scénario C Avec effets prix

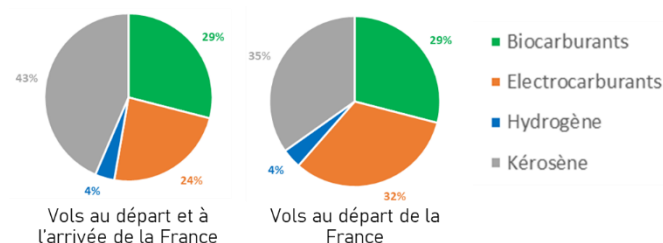


Figure 82 : Composition du mix énergétique en 2050 (en tep) dans le scénario C - Avec effets prix

Dans le **scénario C**, de manière analogue au **scénario A**, les consommations d'électrocarburants font plus que doubler entre 2040 et 2050, et les consommations de biocarburants augmentent essentiellement entre 2030 et 2040 (tout comme dans les autres **scénarios de transition** - Figure 83).

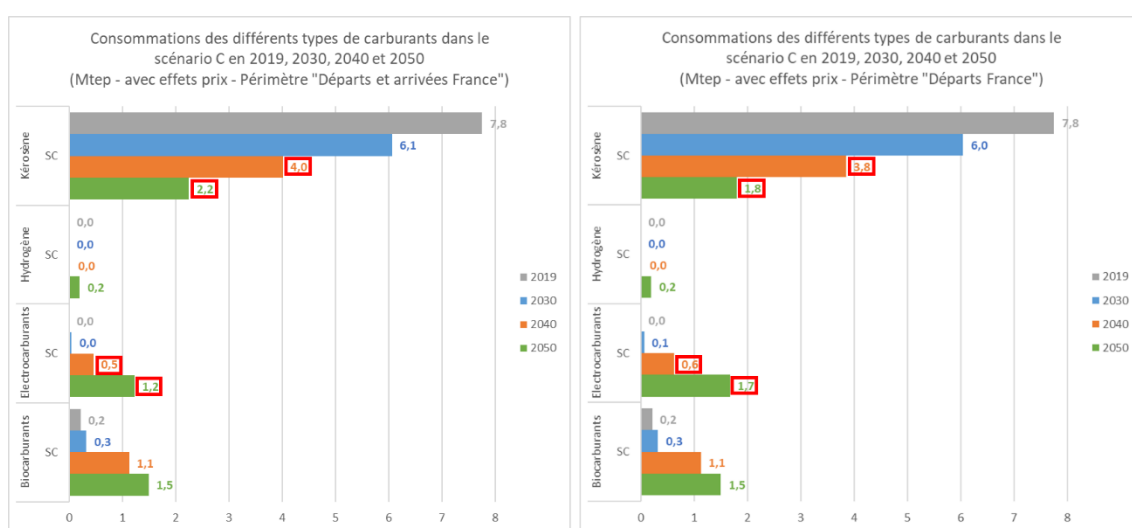


Figure 83 : Consommations des différents types de carburants dans le scénario C en 2019, 2030, 2040 et 2050 (en Mtep – les chiffres en rouge sont ceux qui changent entre les deux graphiques)

**Enseignement n°3 : Les consommations de kérosène seront encore significatives dans tous les scénarios en 2050.**

Par exemple, les vols au départ et à l'arrivée de la France embarquent en moyenne 29 % de kérosène dans le scénario A, 28 % dans le scénario B et 43% dans le scénario C en 2050.

Ces consommations de kérosène ont lieu principalement :

- Dans tous les vols intérieurs et internationaux au départ de l'Outre-mer (pas d'électrocarburants produits sur place) ;
- Dans tous les vols internationaux au départ d'Amérique du Nord, d'Afrique, d'Asie et d'Océanie ;
- Dans les vols au départ de la France métropolitaine et des zones géographiques pertinentes du point de vue de la production d'électrocarburants pour lesquels les avions ne sont pas certifiés pour embarquer plus de 50 % de CAD.

**Enseignement n°4 : Les consommations d'hydrogène restent mineures dans tous les scénarios.**

Dans les scénarios A et C, seuls les commuturs (0,3 % du trafic), les vols régionaux (1,0 % du trafic) ainsi que les vols court-courriers (8,1 % du trafic) peuvent en embarquer.

**Enseignement n°5 : Le développement rapide et la certification de moteurs compatibles avec un mix composé de 100 % de CAD sont essentiels pour ne pas limiter la capacité future des flottes aériennes à embarquer des CAD.**

La conversion des consommations d'énergie finale dans les différents scénarios permet de remettre en perspective les progrès en termes d'efficacité énergétique des flottes. En effet, bien que les consommations d'énergie finale diminuent grâce à ces progrès, les consommations d'énergie primaire augmentent très fortement à cause de la baisse de l'intensité carbone du mix énergétique (Tableau 23).

En effet, la réaction de Fisher-Tropsch qui est utilisée dans les scénarios pour produire des biocarburants durables a un rendement de 20 %. Par conséquent, il est nécessaire d'utiliser 5 tep d'énergie sous forme de résidus de culture pour produire pour 1 tep de biocarburants durable. De manière analogue, il est nécessaire de consommer de l'électricité pour produire de l'hydrogène bas-carbone ainsi que des électrocarburants, et les pertes d'énergies sont importantes au cours des étapes de fabrication de ces types de carburants. A ces pertes s'ajoutent celles inhérentes à la production et au transport de l'électricité consommée.

Tableau 23 : Energie primaire et énergie finale consommée dans les différents scénarios en 2019 et en 2050  
(Périmètre « Départs et arrivées France »)

	2019	2050			
	SO/SA/SB/SC	SO	SA	SB	SC
Kérosène consommé (MtepEF)	7,8	9,3	1,8	1,1	2,2
Biocarburants consommés (MtepEF)	0,0	0,0	1,7	1,6	1,5
Hydrogène consommé (MtepEF)	0,0	0,0	0,4	0,0	0,2
Electrocarburants consommés (MtepEF)	0,0	0,0	2,2	1,1	1,2
<b>Energie finale totale consommée (MtepEF)</b>	<b>7,8</b>	<b>9,3</b>	<b>6,0</b>	<b>3,8</b>	<b>5,2</b>
Pétrole brut consommé pour produire du kérosène (MtepEP)	7,9	9,5	1,8	1,1	2,3
Résidus de culture consommés pour produire des biocarburants (MtepEP)	0,0	0,0	8,4	8,0	7,5
Electricité consommée pour produire des électrocarburants et de l'hydrogène (TWhEF)	0,0	0,0	78,1	36,1	43,6
Energie primaire consommée pour produire l'électricité nécessaire à la production des électrocarburants et de l'hydrogène (MtepEP)	0,0	0,0	17,4	8,0	9,7
<b>Energie primaire totale consommée (MtepEF)</b>	<b>7,9</b>	<b>9,5</b>	<b>27,6</b>	<b>17,1</b>	<b>19,5</b>

**Enseignement n°6 :** Les progrès en termes d'efficacité énergétique permettent de diminuer les consommations totales d'énergies des flottes aériennes dans tous les scénarios de transition entre 2019 et 2050, et ce malgré la hausse du trafic durant cette période dans deux de ces scénarios. Cependant, la baisse de l'intensité carbone du mix énergétique conduit à une forte augmentation des consommations d'énergie primaire du secteur aérien entre 2019 et 2050.

#### 5.1.2.5.2. Une hausse du prix du mix énergétique qui induit des baisses significatives du trafic dans tous les scénarios de transition

Comme expliqué précédemment (Partie 4.4.5.2), l'intégration de CAD et d'hydrogène bas-carbone dans les avions conduit à une hausse du prix du mix énergétique. Dans tous les scénarios de transition, ce prix fait plus que doubler entre 2020 et 2050 (Figure 84).

Dans le scénario 0, la hausse des prix est quant à elle essentiellement liée à la hausse des coûts du kérosène qui augmentent de +37% entre 2019 et 2050.

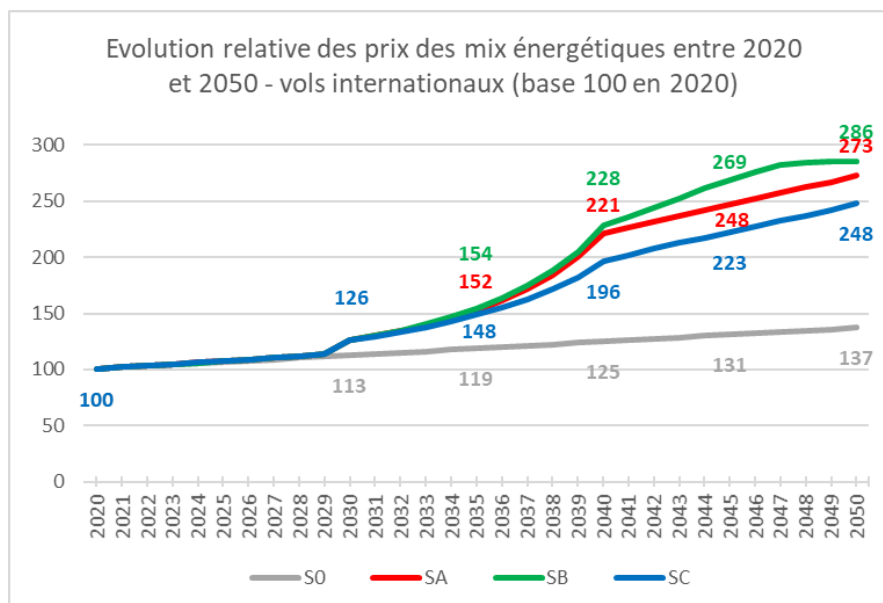


Figure 84 : Evolution relative des prix des mix énergétiques entre 2020 et 2050 - vols internationaux (base 100 en 2020)

La hausse du prix du mix énergétique se traduit par une hausse des coûts de transport, hausse qui est répercutée intégralement sur le prix des billets. L'augmentation de ces prix a elle-même un impact négatif sur la demande.

L'ampleur de cet impact est incertaine, et l'augmentation du prix du mix énergétique peut aboutir à une grande variété d'évolutions du niveau de trafic.

**Enseignement n°7 :** Les effets prix liés aux investissements pour moderniser les flottes, produire et consommer des carburants d'aviation durables auront un impact significatif sur le niveau du trafic. Certains modèles d'affaires, comme les vols court-courriers intra-européens à ultra-bas coûts, pourraient être particulièrement impactés.

Ces diminutions correspondent aux effets prix maximum dans les scénarios. Cependant, ces valeurs ne sont pas retenues dans les scénarios en raison des incertitudes liées :

- A l'évolution des prix de production des CAD et de l'hydrogène entre 2020 et 2050 ;
- A l'évolution de la part des dépenses en carburants dans les dépenses opérationnelles des compagnies aériennes ;
- A l'ampleur des subventions publiques qui seront accordées au secteur par les différents Etats dans le monde ;
- Aux calculs d'impact de l'évolution des prix sur la demande avec des élasticités-prix constantes.

Dans la suite de l'étude, les projections d'évolution du trafic retenues sont celles correspondant aux niveaux médians de trafic (Figure 85).

Dans la Figure 85, les courbes minimum de trafic correspondent aux effets prix maximum. Les courbes de trafic maximum correspondent à une situation où les effets prix sont nuls, c'est-à-dire où les Etats accordent suffisamment de subventions au secteur pour annuler complètement la hausse du prix des billets liée à l'intégration de CAD et d'hydrogène.

Le montant des subventions qui seraient nécessaires pour aboutir à une telle situation est difficile à évaluer et incertain, mais pourrait s'élever selon les estimations réalisées dans le cadre de cette étude à environ 24 milliards d'euros entre 2019 et 2050 pour le **scénario A** pour les vols au départ de la France, à environ 18 milliards d'euros pour le **scénario B** et 13 milliards d'euros pour le **scénario C**. Ces chiffres, qui sont des ordres de grandeur, permettent de donner une idée des montants des subventions qui devraient être accordées par les pouvoirs publics pour supprimer les effets prix.



A noter que les subventions publiques permettant de soutenir la transition écologique du secteur aérien conduisent à deux effets contraires sur les émissions :

- Un effet à la hausse, puisque ces subventions diminuent l'augmentation des dépenses d'opération des compagnies aériennes et donc limitent ou annulent la hausse du prix des billets, et donc in fine les baisses de demande de trafic liées aux effets prix ;
- Un effet à la baisse, puisque ces subventions permettent d'accélérer la transition du secteur, par exemple en accélérant le renouvellement des flottes ou le développement d'avions plus efficaces (comme le vise le Plan de soutien à l'aéronautique - Partie 2.2.3)<sup>77</sup>.

**Enseignement n°8 :** Les Etats peuvent réduire l'impact sur le trafic des effets prix liés à la modernisation des flottes aériennes et à l'intégration de CAD et d'hydrogène bas-carbone en subventionnant le secteur aérien. Néanmoins, les montants des subventions à accorder au secteur pour atténuer les effets prix sont très élevés (potentiellement plusieurs dizaines de milliards d'euros en cumulé sur la période 2019-2050, et entre 2 à 4 milliards d'euros par an en 2050).

Subventionner le secteur aérien pour atténuer les effets prix pourrait potentiellement conduire à une hausse des émissions cumulées de CO<sub>2</sub> sur la période 2020-2050, notamment si les baisses d'émissions liées à l'accélération de la transition du secteur ne permettent pas de compenser les hausses d'émissions liées à la baisse des effets prix (et donc à la hausse du trafic).

Il est donc essentiel que la France quantifie systématiquement les enjeux en termes de gain ou d'augmentation des d'émissions de gaz à effet de serre de ses politiques publiques relatives au secteur aérien, et ce dès le stade de leur élaboration « *pour arbitrer les directions et mesures structurelles proposées, avec une prise en compte adaptée des enjeux GES associés* » comme le recommande le Haut Conseil pour le Climat [105].

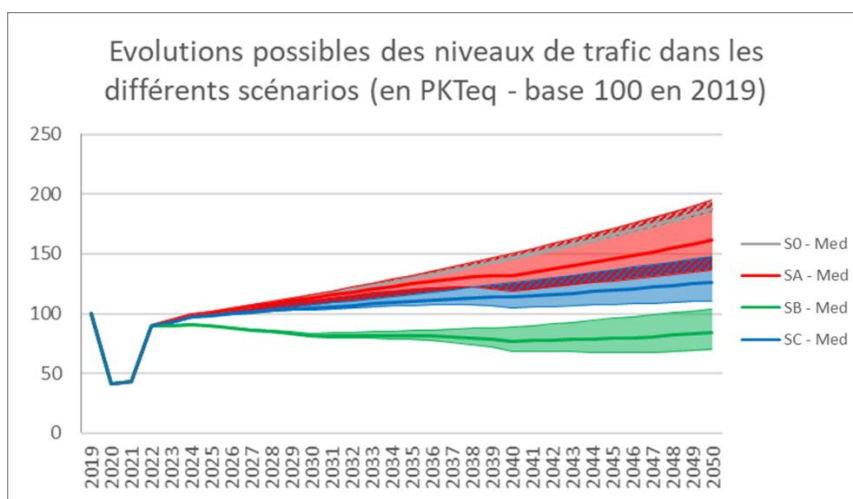


Figure 85 : Evolutions possibles des niveaux de trafic dans les différents scénarios (en PKTeq - base 100 en 2019)

Les projections de niveaux de trafic retenues sont associées à des effets prix qui restent significatifs. En particulier, la baisse du trafic induite par l'utilisation de CAD est la plus forte dans le **scénario B**, dans lequel ils représentent en moyenne une part plus importante du mix énergétique en 2050<sup>78</sup> (même si la quantité de CAD consommée à cette date est moins grande que dans le **scénario A**) (Figure 86).

<sup>77</sup> De telles subventions pourraient par ailleurs permettre d'atténuer les éventuels écarts entre les dépenses d'opération des compagnies aériennes qui auraient été induits par des différences entre des politiques nationales relatives au secteur aérien, et donc éventuellement réduire des effets de fuite carbone.

<sup>78</sup> Au périmètre « Départs et arrivées France ».

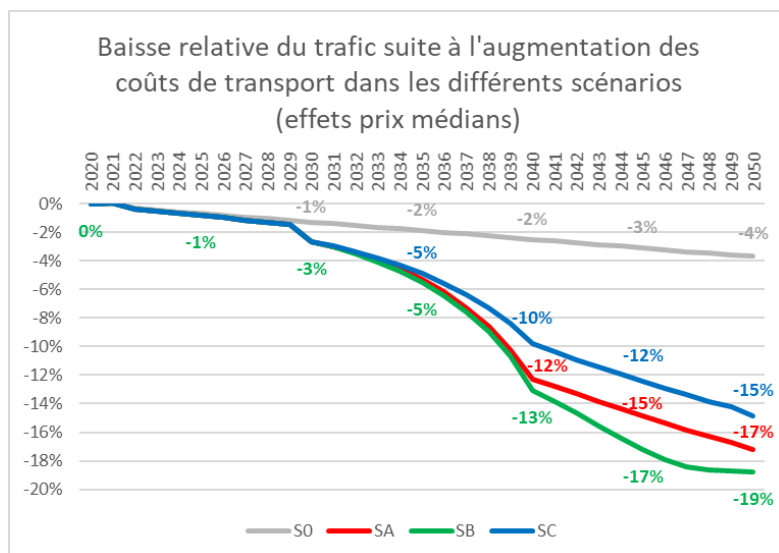


Figure 86 : Baisse du trafic suite à l'augmentation des coûts de transport dans les différents scénarios (effets prix médians)

Ainsi, les effets prix aboutissent :

- **Dans le scénario A** : à une augmentation du trafic continue mais inférieure à celle du **scénario de référence** à partir de 2030. En 2050, le trafic aérien est supérieur de 61 % au trafic de 2019 ;
- **Dans le scénario B** : à une quasi stabilité du trafic jusqu'en 2050. En 2050, le trafic est inférieur de 15 % au trafic de 2019.
- **Dans le scénario C** : à une augmentation très mesurée du trafic entre 2024 et 2040. En 2050, le trafic est supérieur de 26 % au trafic de 2019, ce qui correspond à une augmentation moyenne de 0,9 % par an (Figure 87).

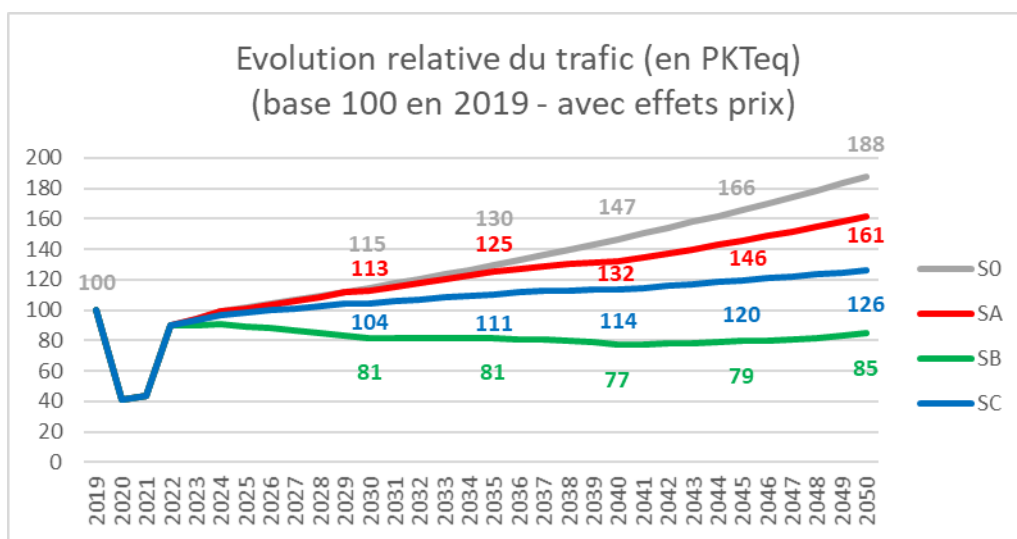


Figure 87 : Evolution relative du trafic (en PKTeq - base 100 en 2019 - avec effets prix)

#### 5.1.2.5.3. La baisse de l'intensité carbone du mix énergétique : troisième levier majeur de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> dans les scénarios de transition

L'intégration de CAD et d'hydrogène bas-carbone dans les avions permet de faire baisser significativement les émissions de CO<sub>2</sub> du secteur aérien. Ce levier permet des réductions moyennes plus rapides des émissions de CO<sub>2</sub> dans le **scénario B** que dans le **scénario A** pour les vols au départ et à l'arrivée de la France du fait de sa mobilisation proportionnellement plus forte permise par les mesures de réduction et de modération du trafic (Figure 88).

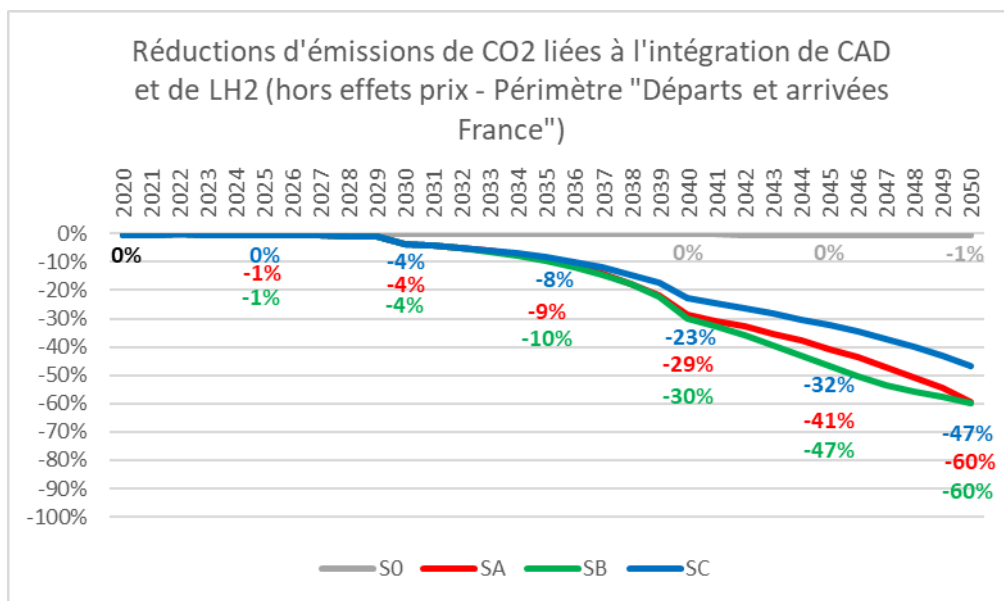


Figure 88 : Réductions d'émissions de CO<sub>2</sub> liées à l'intégration de CAD et de LH<sub>2</sub> par rapport aux émissions liées à l'amélioration de l'efficacité des flottes (hors effets prix - Périmètre "Départs et arrivées France")

Pour les vols au départ de la France, la faible intensité carbone du mix électrique permet une mobilisation accrue des électrocarburants par rapport aux vols arrivant en France, et donc des réductions d'émissions de CO<sub>2</sub> plus fortes dans le **scénario A** que dans le **scénario B** (Figure 89).

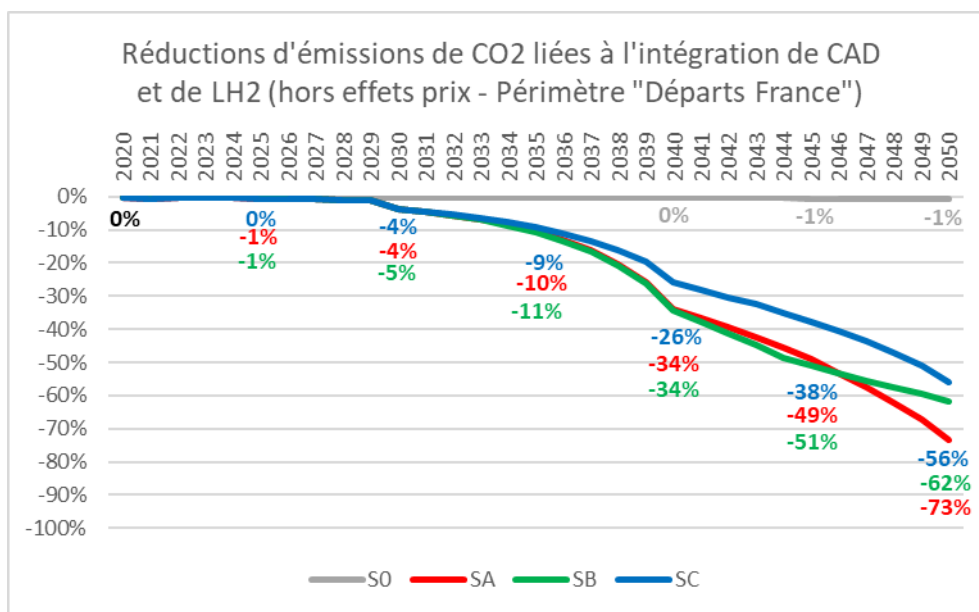


Figure 89 : Réductions d'émissions de CO<sub>2</sub> liées à l'intégration de CAD et de LH<sub>2</sub> par rapport aux émissions liées à l'amélioration de l'efficacité des flottes (hors effets prix - Périmètre "Départs France")

### 5.1.3. Emissions annuelles de CO<sub>2</sub> dans les différents scénarios

#### 5.1.3.1. Emissions unitaires de CO<sub>2</sub>

Les émissions unitaires de CO<sub>2</sub> sont calculées en divisant les émissions de CO<sub>2</sub> (Partie 5.1.3.2) d'une année par la quantité de trafic cette même année (en PKTeq). Elles correspondent donc aux émissions liées à la production, à la distribution et à la combustion des carburants consommés en moyenne pour transporter un passager sur un kilomètre dans chaque scénario.

Ces émissions unitaires baissent de manière très importante dans tous les **scénarios de transition** par rapport au **scénario de référence**, notamment grâce à l'activation de deux des trois leviers majeurs de décarbonation (l'amélioration de l'efficacité énergétique des flottes et l'intégration de CAD et d'hydrogène bas-carbone dans les avions).

**Enseignement n°9 :** L'amélioration de l'efficacité énergétique des flottes et l'intégration de CAD et d'hydrogène bas-carbone dans les avions sont les leviers techniques permettant de réduire significativement les émissions unitaires de CO<sub>2</sub> du secteur aérien.

Ces leviers sont des leviers de moyen et de long terme. En effet, les réductions d'émissions liées à l'amélioration de l'efficacité énergétique nécessitent le développement de nouvelles générations d'avion, et le renouvellement des appareils ne se fait qu'à l'issue d'une durée de vie de 20 à 25 ans. Celui de la baisse de l'intensité carbone du mix énergétique implique une production importante de biocarburants d'aviation durables et d'électrocarburants, production qui nécessite des investissements massifs dès aujourd'hui pour permettre le développement de filières industrielles qui n'existent pas actuellement.

Pour les vols au départ et à l'arrivée de la France :

- Le **scénario A** est celui où les émissions unitaires baissent le plus, du fait des progrès très importants réalisés sur l'efficacité des flottes et de l'utilisation des électrocarburants ;
- Les émissions unitaires baissent aussi de manière très importante dans le **scénario B** grâce aux mandats très ambitieux d'intégration des CAD permis par la réduction et la modération du trafic (et ce en dépit du fait qu'une majorité des appareils en 2050 ne peuvent pas embarquer plus de 50 % de CAD – voir Parties 4.4.3 et 5.1.2.5.1) ;
- La baisse des émissions unitaires est moins marquée dans le **scénario C**, qui mobilise l'ensemble des leviers de décarbonation mais de manière modérée par rapport aux **scénarios A** et **B** (Figure 90).

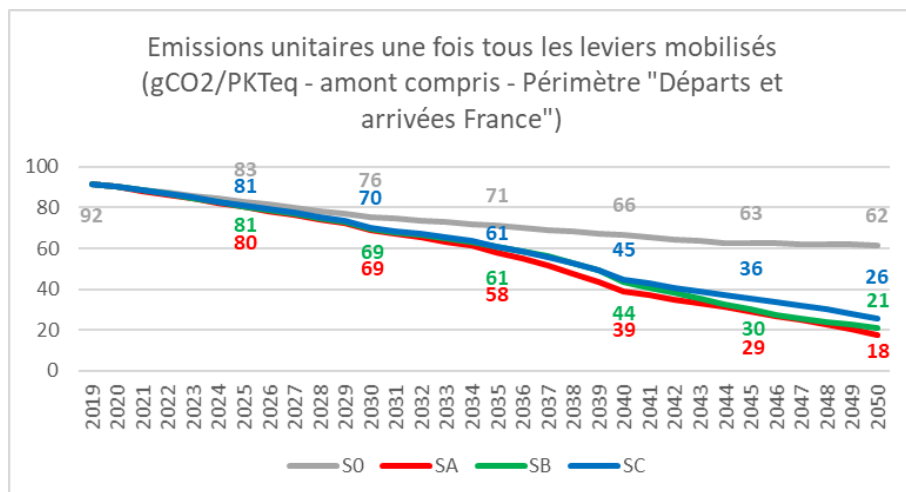


Figure 90 : Emissions unitaires une fois tous les leviers mobilisés (gCO<sub>2</sub>/PKTeq - amont compris – avec effets prix - Périmètre "Départs et arrivées France")

Pour les vols au départ de la France, les émissions unitaires baissent plus fortement dans tous **les scénarios de transition** grâce au recours plus important aux CAD. En effet, la proportion de vols pouvant embarquer des électrocarburants augmente dans tous les **scénarios de transition**, puisqu'ils sont plus nombreux à partir d'une zone géographique pour laquelle les électrocarburants constituent un levier de décarbonation (en l'occurrence la France métropolitaine) (Figure 91).

La différence est plus marquée pour le **scénario A** :

- Qui mobilise les électrocarburants de manière relativement plus importante que dans les **scénarios B** et **C** pour décarboner le mix énergétique des vols ;
- Où les flottes se renouvellent plus vite que dans les **scénarios B** et **C**, et où les appareils sont certifiés plus tôt (c'est-à-dire en 2035 comme dans le **scénario C**) que dans le **scénario B** pour embarquer 100 % de CAD, ce qui implique que les flottes peuvent embarquer proportionnellement plus de CAD que dans les **scénarios B** et **C**.

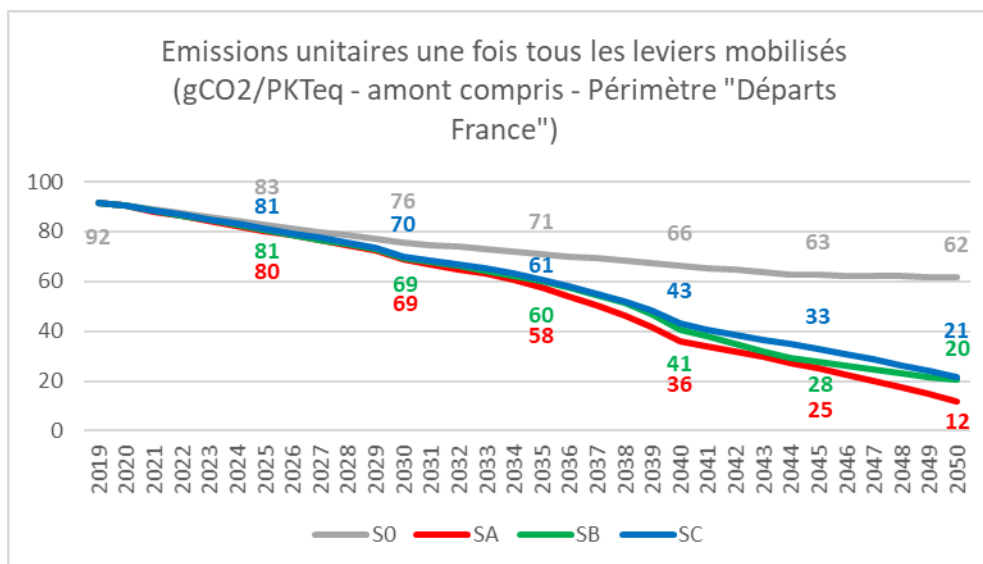


Figure 91 : Emissions unitaires une fois tous les leviers mobilisés (gCO<sub>2</sub> /PKTeq - amont compris – avec effets prix - Périmètre "Départs France")

**Enseignement n°10 :** Il est possible de diminuer très fortement les émissions unitaires entre 2019 et 2050 des vols grâce à la mobilisation des leviers techniques de décarbonation du secteur aérien, notamment celui de l'amélioration de l'efficacité énergétique des flottes (amélioration des appareils et renouvellement des flottes) et celui de la baisse de l'intensité carbone du mix énergétique.

Néanmoins, ces émissions unitaires ne sont pas nulles en 2050. Par conséquent, les vols continueront à émettre des gaz à effet de serre à cette date. La part des émissions liées aux déplacements aériens dans l'empreinte carbone annuelle des voyageurs ne sera donc pas forcément meilleure en 2050 qu'en 2019, et les émissions liées aux déplacements aériens pourront donc continuer à représenter une part importante de l'empreinte carbone de certains individus à cet horizon temporel.

**Enseignement n°11 :** Les vols à destination de la France resteront plus carbonés que ceux en partance de France. En effet, il sera toujours impossible en 2050 de recourir à des électrocarburants bas-carbone dans les vols en provenance de certaines régions du monde (du fait des mix électriques trop carbonés en Amérique du Nord, en Afrique, en Asie et en Océanie).

L'impact climatique réel des voyages diminuera donc moins vite que celui des vols au départ de la France. Il est essentiel que les émissions liées aux vols au départ et à l'arrivée de la France soient suivies au niveau national au même titre que celles liées seulement aux vols au départ de la France, et ce grâce à des indicateurs spécifiques.

Ce suivi contribuera au pilotage de la décarbonation du secteur du tourisme (émissif et réceptif, voir [207]) en France.

### 5.1.3.2. Emissions annuelles de CO<sub>2</sub>

Ces baisses significatives des émissions unitaires dans les scénarios de transition se traduisent par une baisse significative des émissions annuelles de CO<sub>2</sub> du secteur aérien à l'horizon 2050 par rapport au scénario de référence.

- Dans le **scénario 0**, les émissions augmentent entre 2024 et 2045 à un rythme régulier du fait de la croissance du trafic, croissance qui induit une augmentation des émissions qui n'est que partiellement compensée par la modernisation des flottes (qui est accomplie en 2045) et l'amélioration des opérations et des taux de remplissage ;
- Dans le **scénario A**, les émissions annuelles du secteur aérien stagnent entre 2024 et 2035 autour de 22-24 millions de tonnes de CO<sub>2</sub>. En effet, durant cette période, les baisses des émissions unitaires liées à la modernisation des flottes et au recours aux CAD (notamment les biocarburants) compensent les hausses d'émissions liées à l'augmentation du trafic. A partir de 2035, la commercialisation de nouvelles générations d'avions plus efficaces, y compris d'avions à propulsion à hydrogène, ainsi que la forte hausse de la production de CAD, permet de faire baisser rapidement les émissions annuelles de CO<sub>2</sub>.



- Dans le **scénario B**, les émissions annuelles baissent de manière très importante entre 2023 et 2030 sous l'effet des mesures de réduction du trafic. A partir de 2031, l'intégration progressive des CAD (ainsi que dans une moindre mesure l'amélioration de l'efficacité des flottes avec les avions les plus efficaces actuellement disponibles) permet de continuer à faire baisser les émissions annuelles dans un contexte où le trafic baisse très légèrement. A partir de 2041, la commercialisation des nouvelles générations d'avions plus efficaces et la hausse de l'intégration des CAD permet de continuer à faire baisser les émissions annuelles.
- Dans le **scénario C**, les émissions annuelles baissent quasiment au même rythme que dans le scénario A. En effet, les mesures de modération du trafic aérien permettent de compenser la baisse moins importante des émissions unitaires dans ce scénario par rapport au **scénario A**, et donc d'atteindre un résultat similaire (Figure 92).

**Enseignement n°12 :** La réduction du trafic et la modération du trafic par rapport à son niveau de référence sont des leviers de décarbonation disponibles à court terme. Ils permettent une réduction effective des émissions annuelles du secteur à court terme (au moins par rapport au scénario de référence dans le cas de la modération).

Des études supplémentaires sont nécessaires pour savoir dans quelle mesure ce levier est pilotable, c'est-à-dire dans quelle mesure il peut être ajusté à la hausse ou à la baisse en fonction de la trajectoire souhaitée des émissions et les progrès technologiques effectivement déployés.

Il est également nécessaire de mener des études et des expérimentations relatives aux mesures de maîtrise du trafic afin de mieux connaître les obstacles éventuels à leurs mises en œuvre, comprendre et anticiper leurs impacts socio-économiques et permettre leur acceptabilité. Ainsi, la France pourrait statuer sur la légitimité et la faisabilité de mobiliser ce levier de sobriété.

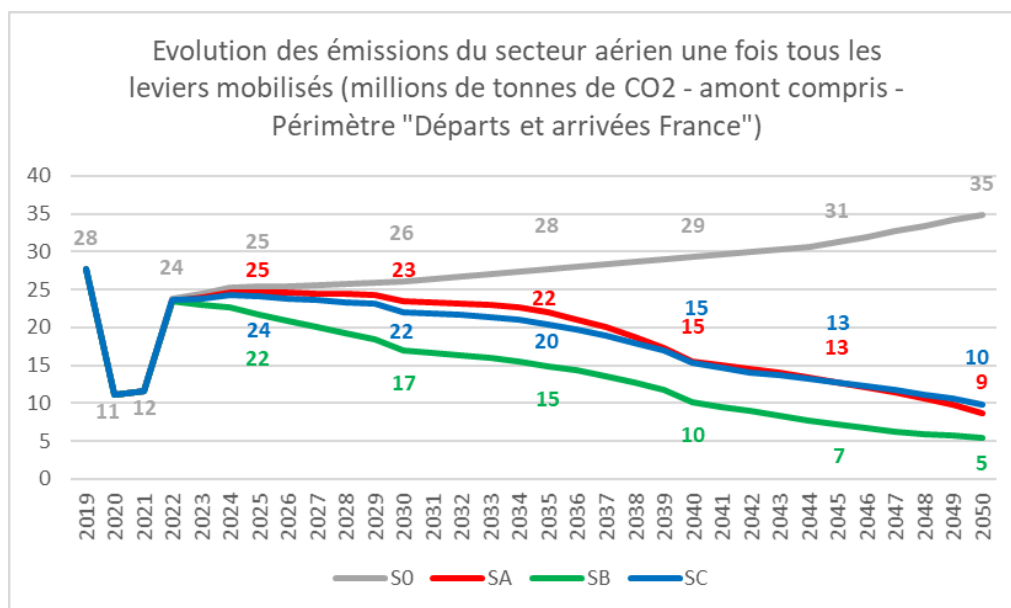


Figure 92 : Evolution des émissions annuelles de CO<sub>2</sub> du secteur aérien une fois tous les leviers mobilisés (millions de tonnes de CO<sub>2</sub> - amont compris - avec effets prix - Périmètre "Départs et arrivées France")

Les émissions annuelles de CO<sub>2</sub> associées uniquement aux vols au départ de la France (Figure 93) baissent plus rapidement que celles associées aux vols au départ et à l'arrivée de la France (Figure 92), puisque ces derniers sont en moyenne plus carbonés (car les émissions unitaires sont plus élevées pour ces vols que pour ceux au départ de la France - Figure 92 et Figure 93).

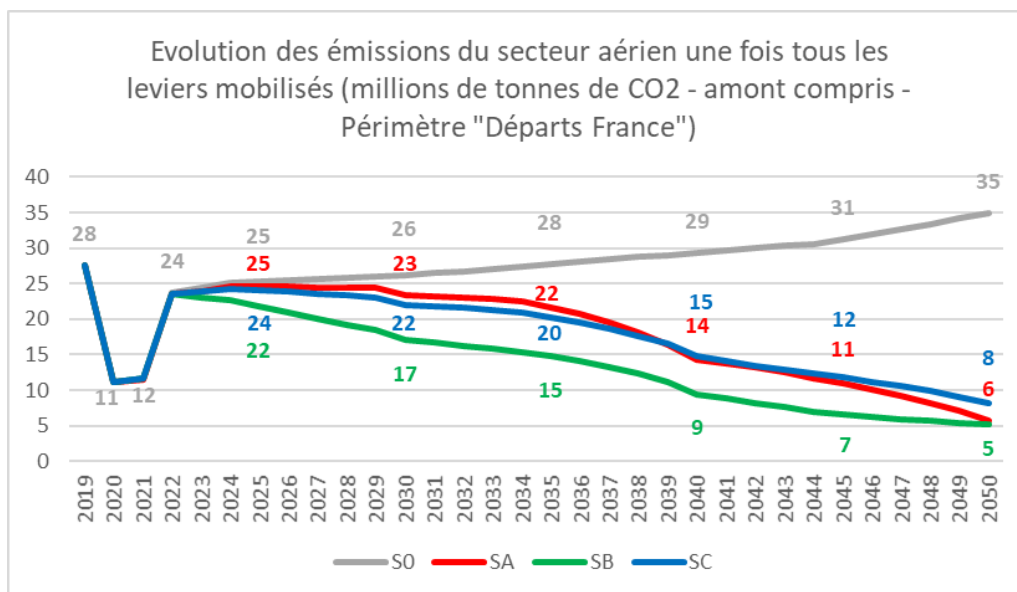


Figure 93 : Evolution des émissions annuelles de CO<sub>2</sub> du secteur aérien une fois tous les leviers mobilisés (millions de tonnes de CO<sub>2</sub> - amont compris – avec effets prix - Périmètre "Départs France")

En 2050, dans le cas où la France atteint les objectifs de réduction des émissions territoriales de Gaz à Effet de Serre (GES) qu'elle s'est fixée dans la Stratégie Nationale Bas-Carbone (SNBC) [9], c'est-à-dire si les émissions territoriales de GES s'élèvent à 80 millions de tonnes de CO<sub>2</sub>eq, les émissions hors amont<sup>79</sup> des vols au départ de la France dans tous les scénarios de transition (Tableau 24) représentent une part moins grande des émissions totales françaises à cette date qu'en 2019, date où cette part s'élevait à 5,3 %<sup>80</sup> [7].

Tableau 24 : Part des émissions HORS AMONT des vols au départ de la France dans les émissions totales françaises en 2050

	S0	SA	SB	SC
Emissions en 2050 – hors amont – vols au départ de la France (millions de tonnes de CO <sub>2</sub> ) <sup>81</sup>	29	2,9	3,2	5,4
Part des émissions françaises en 2050 (80 MtCO <sub>2</sub> eq + ligne du dessus)	22,9%	2,4%	3,1%	4,9%

Cependant, dans les **scénarios A** et **C**, les émissions hors amont<sup>82</sup> des vols au départ et à l'arrivée de la France représentent une part plus grande des émissions totales françaises en 2050 qu'en 2019 (date où cette part s'élevait également à 5,3 % [7]).

<sup>79</sup> Le calcul de la part des émissions du secteur aérien dans les émissions territoriales française est basé sur l'inventaire SECTEN du CITEPA [7] qui ne comptabilise pas les émissions amont liées à la fabrication et au transport du kérosène consommé par les avions dans les émissions du secteur aérien. Pour pouvoir comparer des chiffres similaires, il est donc nécessaire de considérer les émissions hors amont du secteur aérien en 2050.

<sup>80</sup> Pour obtenir ce chiffre, la somme des émissions de GES du secteur aérien français (5,4 MtCO<sub>2</sub>eq) et de celles liées aux vols internationaux comptabilisés en dehors du total national (18,8 MtCO<sub>2</sub>eq) en 2019 a été divisée par la somme des émissions de GES territoriales françaises (436 MtCO<sub>2</sub>eq) et des émissions de GES liées aux transports aériens, y.c compris les vols internationaux comptabilisés en dehors du total national (5,4 + 18,8 = 24,2 MtCO<sub>2</sub>eq) à cette même date [7].

<sup>81</sup> Pour établir ces projections, il a été considéré que les émissions liées à la combustion des CAD étaient nulles. Cette deuxième hypothèse constitue une approximation. En effet, si les émissions liées à la combustion de biocarburants sont bien considérées comme nulles dans les normes de reportage internationales des émissions de GES, il n'existe pas encore de consensus sur celles liées à la combustion d'électrocarburants. Ces chiffres d'émissions excluent de plus les émissions liées à la production et à la distribution de l'énergie consommée par les avions (kérosène, CAD, hydrogène).

<sup>82</sup> Voir note 74 pour les émissions amont. A noter également que le CITEPA ne comptabilise aujourd'hui que les émissions liées aux vols au départ de la France (en utilisant la convention « croisières complètes »). Ces émissions sont actuellement relativement semblables à celles des vols au départ et à l'arrivée de la France (avec la convention « demi-croisières »), ce qui assure la pertinence des résultats présentés dans le Tableau 25.

Tableau 25 : Part des émissions HORS AMONT des vols au départ et à l'arrivée de la France dans les émissions totales françaises en 2050

	SO	SA	SB	SC
Emissions en 2050 – hors amont – vols au départ et à l'arrivée de la France (millions de tonnes de CO <sub>2</sub> )	29	6,2	3,6	7,3
Part des émissions françaises en 2050 (80 MtCO <sub>2</sub> eq + ligne du dessus)	22,9 %	6,2 %	3,6 %	7,0 %

En prenant en compte les émissions amont, la part des émissions de l'aérien stagne ou augmente : en 2019, environ 6 %, puis en 2050, environ 6% pour SB, 7,5 % pour SA et 10 % pour SC.

**Enseignement n°13 :** Sans action supplémentaire par rapport à celles déjà entreprises aujourd'hui, les émissions de CO<sub>2</sub> liées aux vols au départ de la France pourraient augmenter de +26 % entre 2019 et 2050 (Figure 93) et font plus que quadrupler leur part dans les émissions totales françaises (Tableau 24).

Il est cependant possible d'agir dès aujourd'hui pour diminuer fortement ces émissions, comme le prouvent les scénarios de transition.

Ces scénarios illustrent notamment la complémentarité des leviers de réduction/modération des émissions. La réduction et/ou la modération de la demande est le seul levier permettant des réductions rapides des émissions à court terme. Il est cependant nécessaire que les acteurs publics et privés investissent dès aujourd'hui dans la recherche et le développement de nouveaux modèles d'avions et de nouvelles façons de produire des CAD, ainsi que dans des unités et réseaux de production et de distribution de CAD et d'hydrogène et d'électricité bas-carbone. Ces investissements permettront de mobiliser ces deux leviers techniques majeurs de réduction des émissions unitaires de CO<sub>2</sub> et éventuellement de relâcher la contrainte sur le trafic. La temporalité et l'intensité de la mobilisation de ces deux leviers dépendront de celle des investissements.

#### 5.1.4. Emissions cumulées de CO<sub>2</sub> dans les différents scénarios

Les émissions cumulées de CO<sub>2</sub> évoluent de manière relativement similaire entre 2019 et 2050 dans les scénarios A et C, puisque les émissions annuelles évoluent quasiment de la même manière. Néanmoins, les émissions cumulées dans le scénario C sont légèrement inférieures, puisque la mise en place d'actions de modération du trafic dans ce scénario permet de faire baisser les émissions à court terme de manière plus rapide dans le scénario A. Ce dernier scénario rattrape partiellement son léger retard par rapport au scénario C à partir de 2035 grâce à des progrès plus importants en termes d'amélioration de l'efficacité des flottes et d'intégration de CAD et d'hydrogène (toujours par rapport à ce même scénario C). Les émissions cumulées dans ces deux scénarios sur la période 2019 et 2050 sont bien inférieures à celles dans le scénario de référence (Figure 94).

Les émissions cumulées sont encore inférieures dans le scénario B à celles des deux autres scénarios, notamment grâce à la baisse rapide des émissions annuelles de CO<sub>2</sub> entre 2023 et 2030 permise par la réduction du trafic aérien durant cette même période (Figure 94). Le scénario B est donc le plus positif du point de vue climatique, alors que les scénarios A et C sont relativement similaires.

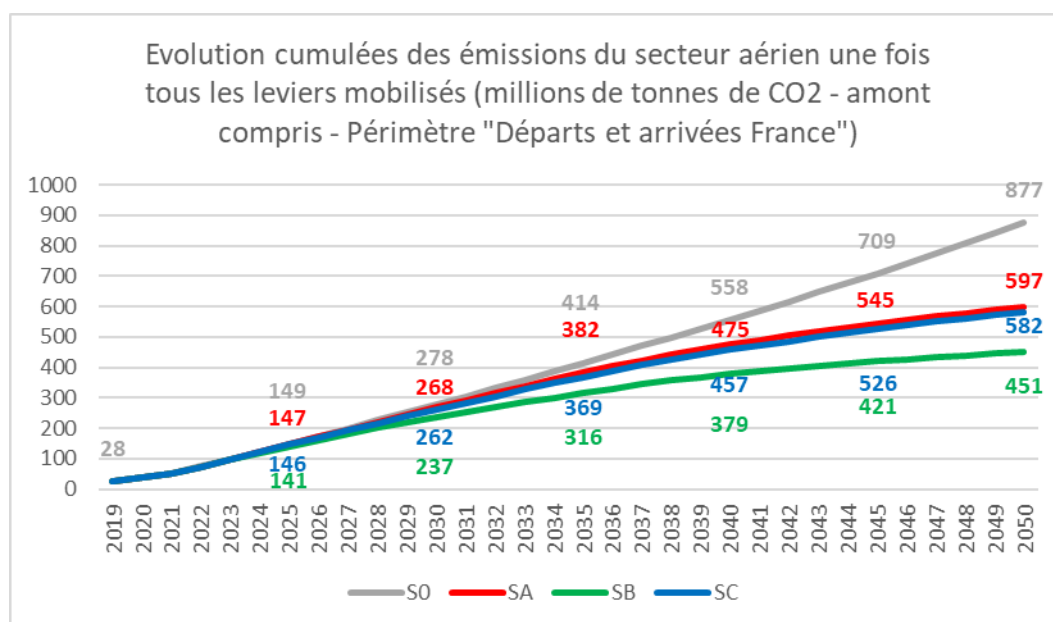


Figure 94 : Emissions cumulées de CO<sub>2</sub> du secteur aérien une fois tous les leviers mobilisés (hors amont – avec effets prix - Périmètre "Départs et arrivées France")

Il existe aujourd'hui peu de niveaux de référence d'émissions cumulées auxquels il serait possible de comparer les émissions cumulées de CO<sub>2</sub> dans les **scénarios de transition**. En effet, ces niveaux de référence sont le plus souvent des « budgets carbone », c'est-à-dire des plafonds d'émissions à ne pas dépasser. La valeur de ces plafonds dépend de choix sociétaux, et est le plus souvent définie à l'aide de scénarios de prospective. Puisqu'il existe une grande variété de choix sociétaux concernant le secteur aérien en France, de nombreux budgets carbone différents pourraient être définis pour le secteur aérien en France entre 2020 et 2050<sup>83</sup>.

A titre d'illustration, il est possible de comparer les émissions cumulées pour les vols au départ et à l'arrivée de la France avec les émissions cumulées du secteur aérien dans le scénario « *Beyond Two Degrees* » (B2DS – en-dessous de deux degrés en français) du rapport « Energy Technology Prospective 2017 » de l'Agence Internationale de l'Energie (AIE) (Figure 95). Ce scénario est un scénario de transition bas-carbone mondial, qui est associé à une probabilité de 50 % de limiter le réchauffement climatique à 1,75°C en 2100 et est donc compatible avec l'Accord de Paris [216].

Dans ce scénario, une trajectoire de décarbonation est calculée pour le secteur aérien au niveau mondial. Les émissions cumulées du secteur aérien dans ce scénario s'élèvent à 22 061 millions de tonnes de CO<sub>2</sub>eq [217]. Dans l'hypothèse où la part des émissions du secteur aérien français dans les émissions mondiales du secteur reste constante à sa valeur actuelle, soit 2,49 % [15], les émissions cumulées pour le secteur aérien français entre 2020 et 2050 s'élèvent à 549 millions de tonnes de CO<sub>2</sub>eq.

Les émissions dans le **scénario B** sont bien en dessous de ce niveau de référence (-23%), alors que le **scénario C** et le **scénario A** se situent légèrement au-dessus de celui-ci. Les émissions cumulées dans le scénario de référence sont enfin très fortement au-dessus (Tableau 26).

<sup>83</sup> Voir par exemple les budgets carbone proposés dans les rapports « Pouvoir voler en 2050 » [15] et « Aviation et climat » [98]

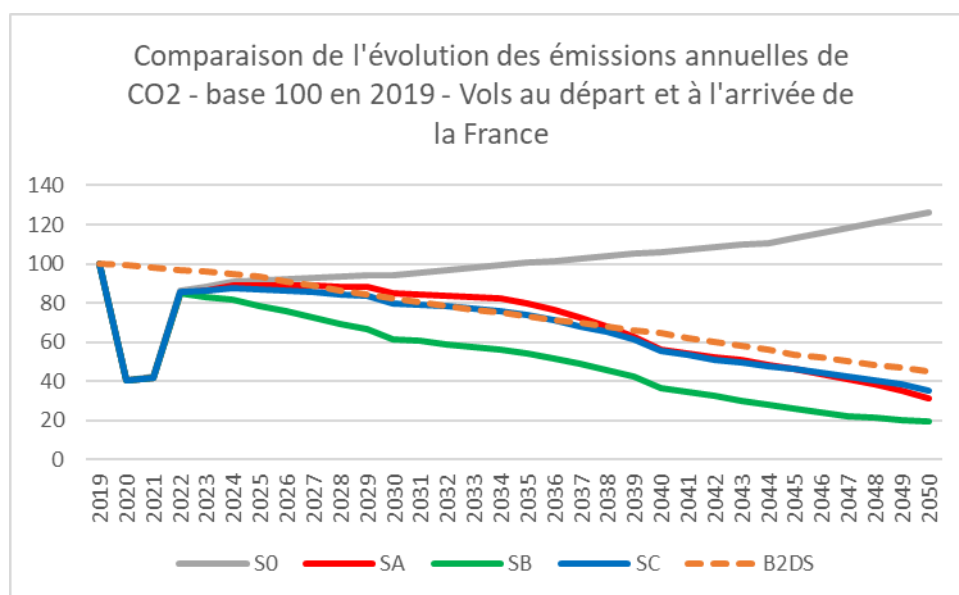


Figure 95 : Evolution relative des émissions du secteur aérien par rapport à 2019 une fois tous les leviers mobilisés (millions de tonnes de CO<sub>2</sub> - amont compris – avec effets prix - Périmètre "Départs et arrivées France")

Tableau 26 : Comparaison des émissions cumulées dans les différents scénarios avec le budget carbone dérivé du scénario B2DS de l'IEA

	S0	SA	SB	SC
Emissions cumulées 2020-2050 (MtCO <sub>2</sub> )	849	570	423	554
Niveau de référence (MtCO <sub>2</sub> ) [15]	549	549	549	549
Ecart	55 %	4 %	-23 %	1 %

Néanmoins, ces résultats restent une illustration, et il n'est pas possible de conclure que les montants des émissions cumulées dans les différents scénarios de cette étude sont satisfaisants ou non.

### 5.1.5. Analyse de la faisabilité et de l'acceptabilité des scénarios

La production de biocarburants d'aviation durables passe par la mobilisation de certains résidus de culture et d'agroforesterie. Le volume de résidus techniquement disponible sera limité en 2050, puisque les résidus doivent tout d'abord être mobilisés pour des usages prioritaires et contraints comme des usages agronomiques. Pour mobiliser les résidus disponibles et pertinents (Tableau 12), le secteur aérien sera en compétition avec d'autres filières comme celles de la production de biocarburants routiers, de bois-énergie ou de matériaux bio-sourcés.

**Enseignement n°14 :** Choisir d'approvisionner massivement le secteur aérien en biocarburants, (comme dans les trois scénarios de transition modélisés qui mobilisent tous au moins 20% des résidus disponibles<sup>38</sup> et pertinents en 2050 – voir Tableau 27) est un choix de politique publique, qui implique d'arbitrer un ordre de priorité entre les différents secteurs du transport aérien, du transport routier, et de la bioéconomie notamment.

L'intégration par la France des émissions liées aux vols internationaux dans ses objectifs climatiques et le périmètre de la SNBC doit être l'occasion de consolider sa vision des besoins en ressources en biomasse à l'horizon 2050, et de mieux planifier la production et la consommation de ces ressources.



Tableau 27 : Part des résidus de culture disponibles et pertinents en 2050 en France<sup>84</sup> utilisés pour produire les biocarburants consommés par les vols au départ de la France

	SA	SB	SC
Biocarburants consommés (Mtep EP)	8,4	7,0	7,5
Biocarburants consommés (Mtep)	1,7	1,4	1,5
Part des résidus de culture disponibles et pertinents en 2050 en France utilisés pour produire les biocarburants consommés par les vols au départ de la France	23 %	20 %	21 %

Pour produire des électrocarburants et de l'hydrogène dans des quantités suffisantes pour faire baisser significativement les émissions de CO<sub>2</sub> du secteur aérien, la France devra revoir à la hausse ses capacités de production ou d'approvisionnement en électricité bas-carbone à l'horizon 2050 (Tableau 28), dans un contexte où l'électricité bas-carbone sera une ressource rare car nécessaire à la décarbonation de tous les secteurs de l'économie.

**Enseignement n°15 :** Choisir d'approvisionner massivement le secteur aérien en électrocarburants et en hydrogène bas-carbone, comme dans le scénario A, est également un choix de politique publique, qui implique :

- Soit d'augmenter l'ambition des objectifs nationaux actuels de production d'électricité bas-carbone ;
- Soit d'arbitrer un ordre de priorité entre les différents secteurs du transport aérien, du transport routier, des bâtiments et de l'industrie notamment, pour augmenter l'ambition des objectifs de réduction de consommation d'électricité de certains de ces secteurs.

D'autres choix sont possibles, comme celui de la réduction et de la modération du trafic (comme dans les scénarios B et C), choix qui réduisent la quantité d'électricité bas-carbone nécessaire pour le secteur aérien.

L'intégration par la France des émissions liées aux vols internationaux dans ses objectifs climatiques et le périmètre de la SNBC doit être l'occasion de consolider sa vision des besoins en électricité bas-carbone à l'horizon 2050, et de mieux planifier la production et la consommation de cette ressource.

Tableau 28 : Part de la production électrique nationale mobilisée en 2050 pour produire les électrocarburants et l'hydrogène bas-carbone en consommés par les vols au départ de la France<sup>85</sup>

	SA	SB	SC
Energie primaire consommée (MtepEP)	23,1	9,5	12,9
Electricité consommée (MtepEF)	8,9	3,7	5,0
Electricité consommée (TWhEF)	103,7	42,6	58,2
Part de la production électrique nationale mobilisée en 2050 pour produire les électrocarburants et l'hydrogène bas-carbone en consommés par les vols au départ de la France	17 %	8 %	10 %

Ces résultats permettent de remettre en perspective les gains d'émissions de CO<sub>2</sub> associés à chacun des scénarios.

### Scénario A :

Le **scénario A** est un scénario qui repose sur des hypothèses optimistes, concernant les progrès technologiques. Pour être mis en œuvre, ce **scénario** implique des investissements conséquents dans la recherche et le développement de nouvelles générations d'avions plus efficaces, ainsi que dans

<sup>84</sup> Selon le scénario B exploratoire du rapport "La biomasse agricole : quelles ressources pour quel potentiel énergétique ?" de France Stratégie [200].

<sup>85</sup> Ce calcul a été réalisé en divisant la quantité d'électricité nécessaire à la production et au transport des électrocarburants et de l'hydrogène bas-carbone consommés par les vols au départ de la France en 2050 dans chacun des scénarios de transition par la projection des consommations d'électricité en France en 2050 selon la Stratégie Nationale Bas Carbone [218] plus cette même quantité d'électricité.

l'installation de nombreuses unités de production de CAD, d'hydrogène bas-carbone et d'électricité bas-carbone. Ce **scénario** implique donc un choix politique clair en faveur du secteur aérien, qui serait considéré comme prioritaire par rapport à d'autres secteurs en termes d'investissements (publics et privés) et de ressources (résidus de culture et d'agroforesterie) Ce **scénario** implique également :

- Soit une augmentation de la production d'électricité bas-carbone par rapport aux projections actuelles françaises ;
- Soit un arbitrage supplémentaire en faveur du transport aérien par rapport à d'autres secteurs (transport routier, bâtiments, industrie notamment) en termes d'approvisionnement en électricité bas-carbone, dans un contexte où celle-ci ne serait pas assez abondante pour couvrir les besoins de toute l'économie française.

Cependant, les émissions baissent peu (de -15%) dans ce **scénario** sur la période 2019-2030. Ces résultats à court terme constitue ainsi l'une des faiblesses de ce **scénario**.

### Scénario B :

Le **scénario B** mobilise quant à lui le levier de la réduction du niveau de trafic aérien entre 2023 et 2030 (qui remonte jusqu'à 91 % de son niveau de 2019 en 2024, avant de baisser d'en moyenne -1,6 % par entre 2024 et 2030 pour aboutir à un niveau -19 % plus faible en 2030 qu'en 2019). Le trafic stagne ensuite entre 2031 et 2034, puis diminue en moyenne de -0,8 % entre 2035 et 2040 avant de croître de manière modérée entre 2041 et 2050, date à laquelle il revient à un niveau légèrement supérieur au niveau de trafic de 2019 (+4 %).

Cette évolution du trafic aura un impact sur différentes parties prenantes :

- Les compagnies aériennes, les aéroports et leurs partenaires du transport aérien dont le modèle économique est basé sur un développement (en volume) de leur activité historique seraient affectées et devraient envisager des changements stratégiques et/ou des réductions de personnel ;
- Les constructeurs aéronautiques seraient peu directement touchés par une telle disposition si elle se limite au trafic en lien avec la France, mais davantage si elle est appliquée progressivement dans d'autres pays. La croissance du secteur de la construction aéronautique française dépendra du volume d'avions exportés, et donc des efforts de modération de trafic consentis par les autres pays ;
- L'impact sur les usagers français eux-mêmes, qui est a priori l'élément le plus important, serait à étudier plus finement, en gardant à l'esprit que cette modération du trafic ne signifie aucunement l'arrêt des vols (stabilisation ici), et que l'usage de l'avion est le fait d'un peu plus d'un tiers de la population française ;
- Les acteurs du tourisme en France devraient revoir leurs prévisions d'activité liée à la venue de touristes étrangers par avion, qui pourrait toutefois être partiellement compensée par la présence en France de touristes français qui iraient moins souvent à l'étranger ;
- Toutes les entreprises françaises qui réalisent des bénéfices grâce au transport aérien (voyages d'affaires, transport de fret...).

Inversement, cette évolution aura un impact positif sur les populations souffrant des nuisances sonores (riverains d'aéroports).

La modération et la réduction du niveau de trafic nécessitent donc pour pouvoir être acceptées des politiques publiques d'accompagnement à la reconversion d'une partie du secteur aérien, ainsi que des autres entreprises touchées par la diminution du trafic. Elles nécessiteront également un changement des préférences et des pratiques des citoyens français vers un tourisme local et bas-carbone. Ce changement de préférence devra permettre de compenser les pertes d'activités et de revenus liés à la diminution du tourisme international longue-distance à destination de la France (du fait de la diminution du nombre de vols à destination de notre pays).

Pour éviter les effets de fuites (c'est-à-dire le report du trafic vers des aéroports étrangers proches des frontières françaises), il est essentiel pour la mise en œuvre de ce **scénario** que la France s'engage par ailleurs à l'international, notamment auprès de l'Union Européenne, pour augmenter l'ambition des objectifs climatiques internationaux relatifs au secteur aérien.

La mise en œuvre de ce scénario nécessitera par ailleurs la mobilisation de mesures de modération ou de réduction du trafic (Partie 6.2.3 et 6.2.4) dont les effets devront être étudiés en amont pour garantir l'atteinte de l'objectif fixé et la bonne adéquation des efforts demandés au secteur avec les réductions d'émissions visées.

Le **scénario B** est un scénario où le secteur aérien n'est pas prioritaire par rapport à d'autres secteurs, et où les investissements à destination de celui-ci sont inférieurs d'un ordre de grandeur à ceux dans le **scénario A**.

Le **scénario B** est enfin un scénario dont l'adoption serait de nature à confirmer la volonté politique d'obtenir à court terme des résultats significatifs en matière de la lutte contre le changement climatique.

#### Scénario C :

Le **scénario C** est sans doute le scénario le moins audacieux, donc le moins risqué en termes d'acceptabilité et de pari technologique, puisqu'il mobilise tous les leviers de décarbonation, et ce de manière plus modérée que dans les autres scénarios de transition. Ce **scénario** est donc associé à des investissements encore très importants mais moins élevés que dans le **scénario A**. La modération du trafic permet de compenser cette différence pour aboutir à des émissions cumulées légèrement inférieures à celles dans le **scénario A** entre 2019 et 2050. Il conduit toutefois à des émissions plus élevées que le **scénario B**. En particulier, la baisse des émissions sur la période 2022-2030 reste faible.

**Enseignement n°16 :** En cas d'une disponibilité moins importante que prévue des gisements en biomasse et en électricité renouvelable nécessaires à la production de CAD et d'hydrogène bas-carbone, il sera nécessaire de mobiliser de manière plus importante le levier de la modération ou de la réduction du trafic pour aboutir aux mêmes réductions d'émissions que dans les scénarios de transition.

## **5.2. Analyse des autres impacts environnementaux des scénarios**

Cette partie de l'étude concerne l'analyse des impacts environnementaux des scénarios de transition écologique en dehors des émissions de CO<sub>2</sub>.

Les enjeux environnementaux liés au secteur aérien et étudiés dans le cadre de cette étude sont les suivants :

- Les **effets hors CO<sub>2</sub>** qui impactent le changement climatique. Il s'agit principalement des traînées de condensation, mais aussi des autres GES, des aérosols... (Partie 2.3.2) ;
- La **qualité et l'artificialisation des sols et des paysages**, sous-découpé en trois enjeux : la préservation de la qualité des sols, la limitation de la consommation d'espaces naturels, agricoles et forestiers et la préservation de la qualité paysagère<sup>86</sup> ;
- La **préservation et le renforcement de la biodiversité** et des services écosystémiques ;
- La limitation de la **pollution de l'air**, à savoir la limitation des émissions de polluants atmosphériques, la présentation de la qualité de l'air extérieur et la limitation de l'exposition des populations aux pollutions de l'air ;
- La limitation des **nuisances sonores** ;
- La limitation de l'exposition des populations aux **risques technologiques**.

Tous ces enjeux sont étudiés de **façon qualitative** sur la base de la littérature existante sur le sujet (voir Annexe 5), et selon le périmètre « Départs et arrivées France » (Tableau 1). La considération de ces enjeux au niveau mondial est donc aussi intégrée à l'étude dans une moindre mesure.

### **5.2.1. Hiérarchisation des enjeux environnementaux liés au secteur aérien**

#### **5.2.1.1. Méthode employée**

Dans un premier temps, les six enjeux environnementaux liés au secteur aérien ont été hiérarchisés selon trois catégories différentes : majeur, important et modéré.

Pour cela, l'évaluation s'est appuyée sur quatre critères :

- Le niveau de **criticité actuel** de l'enjeu au regard de l'état initial, sur un périmètre global et multisectoriel. L'évaluation de ce critère est réalisée selon l'importance de la criticité (maîtrisée, modérée, forte) ainsi que sa spatialisation (ponctuelle, sectorisée ou global) ;

---

<sup>86</sup> Entendu au sens de la Convention de Florence, le terme « paysage » désigne « une partie de territoire telle que perçue par les populations, dont le caractère résulte de l'action de facteurs naturels et/ou humains et de leurs interrelations » [219].

- La **tendance** observée ou projetée de l'évolution globale de l'impact lié à l'enjeu considéré (effets hors CO<sub>2</sub>, qualité de sols, pollution de l'air...). Cette tendance correspond soit à une diminution, soit à une stabilisation, soit à une augmentation de cet impact ;
- Les **impacts** du secteur aérien sur cet enjeu par rapport au reste de l'économie. Ce critère permet de préciser la qualification de l'enjeu au vu du secteur aérien. L'impact est donc qualifié de faible, moyen ou fort ;
- La **marge de manœuvre** du secteur aérien sur l'enjeu, à savoir si les leviers d'actions activables par les acteurs de ce secteur ont un impact fort, moyen ou faible pour diminuer les impacts liés à l'enjeu étudié.

A noter que les deux premiers critères qualifient l'enjeu au niveau global alors que les deux derniers évaluent la contribution du secteur aérien à cet enjeu.

**Barème et formule de l'évaluation** : Pour chacun des critères un barème de 1 à 3 points est attribué. Le score de l'enjeu est obtenu en réalisant une moyenne des scores obtenus pour chacun des critères, avec une pondération double du critère évaluant l'impact du secteur aérien sur cet enjeu.

La qualification de l'enjeu est déterminée en fonction du score total obtenu : pour un score inférieur à 1,5 l'enjeu est qualifié de modéré, pour un score entre 1,5 et 2,5, l'enjeu est qualifié d'important et pour un score supérieur à 2,5, l'enjeu est majeur.

Le Tableau 29 résume la méthodologie de classification des enjeux effectuée ainsi que le barème correspondant :

Tableau 29 : Méthodologie de hiérarchisation des enjeux environnementaux

Critère		Valeurs	Barème
1	Niveau de Criticité actuelle de l'enjeu au regard de l'état initial	Criticité actuelle : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Maîtrisée</li> <li>• Modérée</li> <li>• Forte</li> </ul>	1 point : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sensibilité ponctuelle maîtrisée ou modérée</li> <li>• Sensibilité sectorisée maîtrisée</li> </ul>
		Spatialisation : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ponctuelle</li> <li>• Sectorisée (zones forestières, espaces agricoles, ...)</li> <li>• Enjeu global</li> </ul>	2 points : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sensibilité sectorisée modérée</li> <li>• Sensibilité globale maîtrisée ou modérée</li> </ul>
			3 points : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sensibilité ponctuelle, sectorisée ou globale forte</li> </ul>
2	Tendance actuellement observée ou projetée pour l'enjeu	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Amélioration</li> <li>• Stabilité</li> <li>• Dégradation</li> </ul>	1 point : tendance à l'amélioration 2 points : situation globalement stable 3 points : tendance à la dégradation
3	Impact du secteur par rapport au reste de l'économie	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Faible</li> <li>• Moyen</li> <li>• Fort</li> </ul>	1 points : impact faible 2 points : impact moyen 3 points : impact fort
4	Marge de manœuvre/levier d'action du secteur sur l'enjeu	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Faible</li> <li>• Moyen</li> <li>• Fort</li> </ul>	1 point : impact faible 2 points : impact moyen 3 points : impact fort
$\text{Score de l'enjeu} = \frac{C1+C2+C3*2+C4}{5}$ <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\text{Score} &lt; 1,5 \rightarrow</math> Enjeu modéré</li> <li>• <math>1,5 &lt; \text{Score} &lt; 2,5 \rightarrow</math> Enjeu important</li> <li>• <math>2,5 &lt; \text{Score} \rightarrow</math> Enjeu majeur</li> </ul>			

#### 5.2.1.2. Partis pris méthodologiques et limites de la méthode employée

L'analyse des impacts environnementaux du secteur aérien porte sur le même périmètre que celui de l'étude. Cette analyse inclut donc notamment les impacts des vols, de la production et de la distribution de l'énergie consommée par les avions, des aéroports et de l'accès vers et depuis les aéroports (voir Partie 1.3 pour plus de détails). Cette analyse ne porte donc pas sur les impacts environnementaux liés à l'ensemble des voyages, c'est-à-dire ceux générés par les voyageurs lors de leurs séjours (déplacements, logement, consommations, activités...). L'état des connaissances scientifiques et l'existence d'un consensus au niveau mondial sur les différents enjeux environnementaux identifiés (Partie 5.2) dépendent de l'enjeu considéré et sont fonction d'un certain nombre de paramètres (tels que le nombre de

publications scientifiques, les années de recherche sur le sujet, le périmètre géographique de l'enjeu considéré, sa variabilité en fonction de spécificités locales et régionales...). Un certain nombre de ces enjeux comme celui des « Effets hors CO<sub>2</sub> » sont ainsi encore largement débattus au sein de la communauté scientifique, ce qui justifie le choix de réaliser une étude qualitative sur l'impact de scénarios de transition écologique sur le sujet.

En ce qui concerne la définition du critère 3 « Impact du secteur par rapport au reste de l'économie », il a été choisi de ne pas identifier de seuils quantitatifs d'émission limite à partir desquels le critère passerait de faible à moyen à fort.

### 5.2.1.3. Résultats

La méthode décrite ci-dessus (Partie 5.2.1.1) a donc été appliquée aux 6 enjeux identifiés. Il ressort de cette analyse, dont le détail est disponible en Annexe 5, les conclusions suivantes :

- Un seul enjeu est qualifié de **majeur** : les effets hors CO<sub>2</sub> qui impactent le changement climatique (autres GES, traînées de condensation, ...);
- Quatre enjeux sont qualifiés **d'importants** : les nuisances sonores, la pollution de l'air et la qualité et artificialisation des sols et paysages et la biodiversité;
- Un enjeu est qualifié de **modéré** : les risques technologiques.

Le Tableau 30 résume les résultats de cette analyse.

Tableau 30 : Résultats de la hiérarchisation des enjeux environnementaux liés au secteur aérien

Enjeux environnementaux		Criticité actuelle de l'enjeu	Evolution globale de l'enjeu	Impact du secteur	Marge de manœuvre du secteur	Niveau d'enjeu
Changement climatique	Réduire les effets hors CO <sub>2</sub> : autres GES, traînées de condensation, aérosols..	G	↓	Fort	Fort	Majeur
Qualité et artificialisation des sols & paysages	Préserver la qualité des sols	S	↓	Moyen	Moyen	Important
	Limiter la consommation d'espaces naturels agricoles et forestiers	S	↓	Faible	Faible	Important
	Préserver la qualité paysagère	S	↑	Faible	Faible	Modéré
Biodiversité	Préserver et renforcer la biodiversité et les services écosystémiques	G	↓	Faible	Moyen	Modéré
Pollution de l'air	Limiter les émissions de polluants atmosphériques et préserver la qualité de l'air extérieur	S	↓	Moyen	Moyen	Important
Bruit	Limiter les nuisances sonores	S	↓	Moyen	Moyen	Important
Risques technologiques	Limiter l'exposition des populations aux risques technologiques	P	↑	Faible	Faible	Modéré

**Légende :**

Dégradation de l'enjeu  
 Amélioration de l'enjeu

Fort  
 Modéré/Moyen  
 Faible

Global

Sectorisée

Ponctuelle

## 5.2.2. Evaluation des impacts des scénarios sur les enjeux environnementaux hiérarchisés

### 5.2.2.1. Méthode employée

L'évaluation de l'impact de chacun des scénarios de transition écologique sur les enjeux environnementaux identifiés (Partie 5.2) et hiérarchisés (Tableau 30) a été effectuée selon la méthode suivante :

1. Tous les leviers du secteur pouvant impacter cet enjeu sont recensés. Les leviers ainsi sélectionnés font partie des leviers de décarbonation du secteur (Partie 2)<sup>87</sup>;
2. L'impact de chaque levier de décarbonation sur l'enjeu concerné en fonction de son niveau d'activation est étudié via une analyse bibliographique ;
3. Cette analyse bibliographique permet ainsi de qualifier le poids de chaque levier sur l'enjeu global (poids faible, moyen ou fort) ;

<sup>87</sup> Parmi les leviers suivants : Maîtrise du trafic, report modal, utilisation des biocarburants et de PtL, utilisation d'hydrogène, efficacité énergétique – amélioration de la consommation, efficacité énergétique – amélioration des opérations.

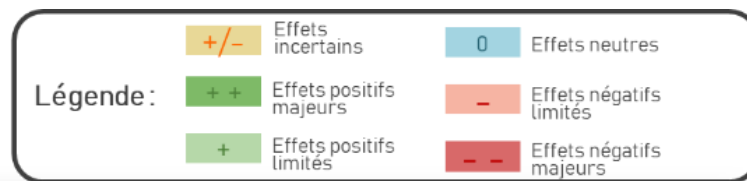


4. Les effets de l'activation de chaque levier pour chaque scénario en fonction de son niveau d'activation sont déterminés grâce aux résultats de l'étape 2. Ces effets peuvent prendre six valeurs différentes :
  - i. Effets positifs majeurs ;
  - ii. Effets positifs limités ;
  - iii. Effets neutres ;
  - iv. Effets négatifs limités ;
  - v. Effets négatifs majeurs ;
  - vi. Effets incertains.

La valeur « effets incertains » peut être attribuée dans deux cas :

  - lorsque la recherche scientifique n'est pas assez aboutie pour se prononcer sur le sujet ;
  - lorsque les effets peuvent être soit négatifs soit positifs en fonction de choix technologiques réalisés et que cet arbitrage ne fait pas partie des hypothèses réalisées dans le cadre de cette étude.
5. Analyse qualitative de l'effet global du scénario sur l'enjeu en prenant en compte les résultats de l'étape 4 et la prise en compte du poids de chaque levier (étape 3).

La Figure 96 illustre la méthodologie appliquée pour évaluer l'impact des scénarios sur chacun des enjeux.



Enjeu environnemental	Enjeu environnemental Sous-catégories	Rappel du niveau d'enjeu issu de l'état initial de l'environnement	Levier(s) correspondant(s)	Poids du levier sur l'enjeu	SB - niveau d'incidence probable des caractéristiques du scénario	SB Synthèse globale	SA - niveau d'incidence probable des caractéristiques du scénario	SA Synthèse globale	SB - niveau d'incidence probable des caractéristiques du scénario	SB Synthèse globale	SC - niveau d'incidence probable des caractéristiques du scénario	SC Synthèse globale	Commentaires	Source(s)
Bruit	Limites des nuisances sonores	Important	Maîtrise du trafic	Fort	--		-		++		0		La quantité de trafic est directement liée aux nuisances sonores engendrées lors de la phase de vol et dans les aéroports, mais aussi lors de l'accès aux aéroports (principalement via le transport routier).	
			Report modal	Modéré	0		0		-		-		En cas de report modal vers le train, les nuisances sonores associées sont plus importantes : elles impactent non seulement les riverains des gares mais aussi les riverains de toutes les lignes du Réseau Ferré National. Cette nuisance sera amplifiée si la croissance de trafic est telle que de nouveaux réseaux doivent être développés ou la fréquence de circulation augmentée. En cas de report modal vers le transport routier électrique la mobilité thermique est évitée car peu bénéfique sur les émissions de CO2, la nuisance est diminuée.	
			Efficacité énergétique - amélioration de la consommation	Modéré	0		+		+		+		Les modifications dans les moteurs utilisés peuvent avoir un impact positif sur le bruit. Par exemple l'augmentation du taux de dilution ainsi que l'utilisation de turbopropulseurs (moins consommateurs) à la place de turbofans diminue le bruit. Néanmoins cet impact est à analyser précautionneusement car les choix des technologies qui seront intégrés aux futurs modèles ne sont pas encore réalisés et dépendent d'arbitrages à venir. Il s'agit en effet de s'assurer que les normes sonores continueront à se renforcer même en cas de rupture technologique. Cette analyse estime que l'arbitrage sera probablement réalisé en faveur d'une diminution des nuisances sonores au vu des demandes actuelles des populations.	CI, <a href="https://www.easa.europa.eu/easa/system/files/air_uploaded/219473_EASA_EAER_2019_WEB_HI-RES_130311.pdf">https://www.easa.europa.eu/easa/system/files/air_uploaded/219473_EASA_EAER_2019_WEB_HI-RES_130311.pdf</a> , page 31
			Efficacité énergétique - amélioration des opérations	Modéré	+		++		+		+		L'optimisation des trajectoires au vol et au sol permet de limiter les nuisances sonores : diminution du temps de présence des avions auprès des aéroports, du temps de roulage, procédures d'approche, électrification des engins au sol...	

1 Identification des leviers de décarbonation du secteur agissant sur l'enjeu

3 Identification du poids des leviers dans l'évaluation globale de l'impact de l'enjeu

4 Analyse de l'impact de l'activation du levier par scénarios, en fonction du niveau d'activation du levier dans le scénario

	SB - Différence	SA - Différence	SB - Scénario	SC - Scénario
Maîtrise du trafic	1	1	1	1
Report modal	1	1	1	1
Efficacité énergétique - amélioration de la consommation	1	1	1	1
Efficacité énergétique - amélioration des opérations	1	1	1	1
Intensité d'activation des leviers par scénarios	1	1	1	1

Intensité d'activation des leviers par scénarios

5 Synthèse de l'impact du scénario sur l'enjeu en fonction de 4 et 3

2 Analyse de l'impact de l'activation du levier sur l'enjeu

Figure 96 : Méthodologie de qualification de l'impact des enjeux, illustration sur l'exemple de l'enjeu « nuisances sonores »

#### 5.2.2.2. Partis pris méthodologiques et limites de la méthode employée

La méthode d'analyse employée étant qualitative, certains éléments peuvent être soumis à interprétation. C'est notamment le cas :

- De l'évaluation du poids des leviers dans l'évaluation globale de l'impact d'un enjeu (étape 3) qui est réalisée sans critère quantitatif ;
- De l'analyse qualitative de l'effet global du scénario sur l'enjeu selon les contributions de chaque levier (étape 5), qui nécessite de comparer des impacts qualitatifs.

Les partis pris employés lors de l'évaluation qualitative sont ainsi principalement liés à des manques de connaissances ou de consensus scientifiques sur certains sujets, mais aussi à des comparaisons d'impacts de différentes natures et amplitudes.

L'analyse permet en plus de définir des niveaux d'effets des scénarios par enjeux. Il aurait pu être envisagé de pousser la comparaison plus loin en pondérant l'importance des enjeux entre eux afin d'obtenir une comparaison des scénarios entre eux vis-à-vis de cette « moyenne des enjeux environnementaux ». Cette analyse n'a pas été retenue dans cette étude car comparer les enjeux entre eux semble périlleux et non souhaitable au vu de leur nature même.

### 5.2.2.3. Impacts détaillés des scénarios pour chaque enjeu hiérarchisé

#### 5.2.2.3.1. Enjeu 1 : Atténuer les effets hors CO<sub>2</sub> – Enjeu Majeur

Le Tableau 31 résume l'analyse effectuée de l'impact des différents leviers de décarbonation du secteur aérien sur l'enjeu "Atténuer les effets hors CO<sub>2</sub>" avec les leviers pertinents identifiés pour cet enjeu et le poids du levier correspondant estimé au vu de la justification présentée.

Tableau 31 : Analyse de l'impact des différents leviers de décarbonation du secteur aérien sur l'enjeu "Atténuer le changement climatique"

Levier(s) correspondant(s)	Poids du levier sur l'enjeu	Justification / impact
Maîtrise du trafic <sup>88</sup>	Fort	Les émissions hors CO <sub>2</sub> sont directement proportionnelles à la quantité de trafic pour la grande majorité des vols, toutes choses égales par ailleurs
Report modal	Fort	Le report modal valorisé ici est celui qui se fait aux bénéfices d'un mode de transport peu carboné, principalement le train. Celui-ci émet peu d'autres GES et produit peu d'autres impacts hors CO <sub>2</sub> (pas de traînées de condensation, peu d'aérosols...)
Utilisation de biocarburants et de PtL	Faible	Il n'y a pas de consensus scientifique sur le sujet, avec notamment un manque de connaissance portant sur le lien entre la composition du carburant, la physique des traînées de condensation et l'impact climatique. Dans le cadre de cette étude, l'utilisation de CAD n'est donc considéré n'avoir ni effet positif ni effet négatif sur les émissions hors CO <sub>2</sub> . Néanmoins une étude récente [220] laisse penser que l'utilisation de CAD pourrait avoir un effet bénéfiques sur les traînées de condensation (elle induirait une réduction de 50 à 70 % de réduction de suie et des traînées de condensation, ce qui impliquerait une réduction du forçage radiatif effectif induit par l'aviation).
Utilisation d'hydrogène	Modéré	Les effets hors CO <sub>2</sub> de l'utilisation d'hydrogène sont de nature diverse. En effet, si les émissions de NOx sont limitées avec cette technologie (absence de NOx pour l'utilisation de piles à combustible, NOx réduits dans une turbine à hydrogène par rapport à la combustion de kérosène), les émissions de vapeur d'eau sont supérieures que dans le cas de kérosène. Ces émissions ont aujourd'hui un impact dix fois inférieur à l'impact du CO <sub>2</sub> mais cette répartition pourrait évoluer avec l'augmentation des vapeurs d'eau par un facteur 2,5 avec l'utilisation d'hydrogène. Finalement, les effets de l'utilisation d'hydrogène sur la création de nuages induits ne sont pas encore bien maîtrisés. Les impacts sont a priori annoncés inférieurs à la combustion de kérosène avec un impact supérieur dans le cas de combustion de l'hydrogène (-30 à -50 %) par rapport à l'utilisation de piles à combustibles (-60 à -80 %) [169].
Efficacité énergétique – amélioration de la consommation	Modéré	L'amélioration énergétique permet une plus faible consommation de carburant pour le même usage, avec pour conséquence un impact plus faible sur les effets hors CO <sub>2</sub> .

<sup>88</sup> Ce terme est employé dans la suite du document pour parler de manière conjointe de réduction ou de modération du trafic.

		<p>Par ailleurs, certaines technologies moteurs permettent de diminuer les effets climatiques hors CO<sub>2</sub> notamment en limitant l'émission de particules fines et donc la nébulosité induite. Il semble très probable que les nouveaux avions soient équipés de ces nouvelles technologies [15].</p> <p>Néanmoins, il n'est pas certain que les nouvelles technologies intègrent ces améliorations et les ordres de grandeur correspondants étant incertains, le poids de ce levier est jugé « modéré ».</p>
Efficacité énergétique - des améliorations des opérations	Fort	<p>La modification des trajectoires de certains avions permettrait de réduire fortement les effets hors CO<sub>2</sub> de l'aviation et particulièrement la formation des traînées de condensation qui ont principalement lieu à certaines altitudes et dans certaines conditions particulières. La mesure de cet impact présente cependant encore de très grandes marges d'incertitudes et les connaissances scientifiques sont à approfondir [221] et [222]. Si un consensus scientifique est atteint sur ce sujet, les calculs des nouvelles trajectoires devront à la fois prendre en compte les effets CO<sub>2</sub> et ceux non CO<sub>2</sub> pour que ces nouvelles trajectoires aient un impact climatique positif.</p>

Au vu de ces impacts et de l'activation de ces leviers dans les scénarios (Figure 63), les résultats obtenus sont les suivants :

Tableau 32 : Analyse de l'impact des différents scénarios sur l'enjeu "Atténuer le changement climatique"

Levier(s) correspondant(s)	Poids du levier sur l'enjeu	Niveau d'incidence probable des caractéristiques du scénario							
		S0 - Détail	S0- Synthèse	SA - Détail	SA- Synthèse	SB - Détail	SB- Synthèse	SC - Détail	SC- Synthèse
Maîtrise du trafic	Fort	--		-		++		0	
Report modal	Fort	0		0		++		0	
Utilisation de biocarburants et de PtL	Faible	0		+ / -		+ / -		+ / -	
Utilisation d'hydrogène	Modéré	0		+ / -		0		+ / -	
Amélioration de la consommation	Modéré	+		++		+		+	
Amélioration des opérations	Fort	+		++		+		+	

A noter que la valeur de la synthèse globale est qualifiée au vu de la criticité et du poids de chacun des leviers sur l'enjeu examiné.



### 5.2.2.3.2. Enjeu 2 : Qualité et artificialisation des sols & paysages – Enjeu Important

Tableau 33 : Analyse de l'impact des différents leviers de décarbonation du secteur aérien sur l'enjeu "Qualité et artificialisation des sols & paysages»

Enjeux environnementaux Sous-catégories	Levier(s) correspondant(s)	Poids du levier sur l'enjeu	Justification / impact
Préserver la qualité des sols	Utilisation de biocarburants et de PtL	Fort	<p>L'impact sur les sols de la production de biocarburants est limité car ceux-ci sont produits à partir de résidus agricoles/forestiers. En revanche il est à noter que si le secteur décide de produire des biocarburants à partir de monocultures énergétiques dédiées (tel le miscanthus), une gestion durable des terres doit être réalisée afin de limiter l'impact sur la qualité des sols : disparité des cultures, type de sol précédant la culture, rendements, utilisation raisonnée d'engrais et/ou de pesticides...</p> <p>Par ailleurs, la production de l'électricité nécessaire à la production des PtL et de l'hydrogène consommés dans les différents scénarios nécessite des installations de production d'électricité supplémentaires par rapport à celles actuelles (dans un contexte d'augmentation de la demande globale en électricité). Par conséquent, les consommations de PtL et d'hydrogène contribuent à l'artificialisation des terres [223].</p>
Limiter la consommation d'espaces naturels agricoles et forestiers	Maîtrise du trafic	Faible	<p>La quantité de trafic aérien est directement liée au nombre d'aéroports nécessaires ainsi qu'à leur superficie bien que cette relation ne soit pas linéaire (phénomène d'<i>upgauging</i> permettant de transporter plus de passagers pour une taille identique d'aéroport). C'est la différence avec le trafic de 2019 qui est ici étudiée afin de connaître l'augmentation de la superficie des aéroports. Ainsi, la surface des aéroports augmente très fortement dans le scénario de référence, augmente dans le scénario A, se maintient dans le scénario C et diminue dans le scénario B (en effet dans dernier scénario, nous considérons que les aéroports renaturalisent les pistes désaffectées. Il s'agit d'une hypothèse forte, mais cohérente avec les besoins d'une transition globale de l'économie française vers une société bas-carbone).</p> <p>Par ailleurs, sans la mise en place de mesures de réduction et/ou de modération du trafic, celui-ci va augmenter (comme dans le scénario A), les accès aux aéroports devront être renforcés, ce qui aura des impacts directs sur l'urbanisation des terres (les aéroports étant majoritairement situés en périphérie des villes).</p>
	Report modal	Fort	Un report modal vers des modes de transports peu carbonés peut provoquer une augmentation de l'utilisation des sols. C'est notamment le cas pour le transport ferroviaire (resp. routier) lorsque la croissance de trafic est telle que de nouveaux réseaux doivent être développés. La construction de nouvelles lignes (resp. axes routiers) représentent une plus grande emprise sur les sols (et donc artificialisation induite) que les espaces aéroportuaires.
	Utilisation de biocarburants et de PtL	Fort	Justification identique que pour l'enjeu « préserver la qualité des sols ».

Préserver la qualité paysagère	Maîtrise du trafic	Faible	Justification identique que pour le levier « Maîtrise du trafic » de l'enjeu « Limiter la consommation d'espaces naturels ».
	Report modal	Fort	Justification identique que pour le levier « Report modal » de l'enjeu « Limiter la consommation d'espaces naturels ».
	Utilisation de biocarburants et de PtL	Modéré	Justification identique que pour l'enjeu « préserver la qualité des sols ».

Tableau 34 : Analyse de l'impact des différents scénarios sur l'enjeu "Qualité et artificialisation des sols & paysages"

			Niveau d'incidence probable des caractéristiques du scénario							
Sous-catégories d'enjeux	Levier(s) correspondant(s)	Poids du levier sur l'enjeu	S0 - Détail	S0- Synthèse	SA - Détail	SA- Synthèse	SB - Détail	SB- Synthèse	SC - Détail	SC- Synthèse
Préserver la qualité des sols	Utilisation de biocarburants et de PtL	Fort	0	-	--	--	-	-	-	-
Limiter consommation d'espaces naturels agricoles forestiers	Maîtrise du trafic	Faible	--		-		+		0	
	Report modal	Fort	0		0		--		0	
	Utilisation de biocarburants et de PtL	Fort	0		--		-		-	
Préserver la qualité paysagère	Maîtrise du trafic	Faible	--		-		+		0	
	Report modal	Fort	0		0		--		0	
	Utilisation de biocarburants et de PtL	Modéré	0		--		-		-	

### 5.2.2.3.3. Enjeu 3 : Préserver et renforcer la biodiversité et les services écosystémiques – Enjeu Important

Tableau 35 : Analyse de l'impact des différents leviers de décarbonation du secteur aérien sur l'enjeu "Préserver et renforcer la biodiversité et les services écosystémiques"

Levier(s) correspondant(s)	Poids du levier sur l'enjeu	Justification / impact
Maîtrise du trafic	Modéré	La quantité de trafic aérien a notamment trois impacts qui influent négativement sur la biodiversité : les nuisances sonores engendrées au sein des aéroports et lors des vols, l'occupation des espaces au sol (par les aéroports ou les accès à ceux-ci ce qui provoque l'artificialisation des sols), la pollution locale générée près des aéroports ou sur les trajectoires réalisées. Plus la quantité de trafic aérien est importante, plus ces impacts le sont aussi.
Report modal	Modéré	Un report modal vers des modes de transports peu carbonés peut provoquer une augmentation des nuisances sur la biodiversité. C'est notamment le cas pour le transport ferroviaire (resp. routier) lorsque la croissance de trafic est telle que de nouveaux réseaux doivent être développés : la construction de nouvelles lignes (resp. axes routiers) représente une ingérence sur les lieux de vie de certaines espèces (notamment sur certaines zones protégées).
Utilisation de biocarburants et de PtL	Fort	<p>L'impact sur la biodiversité de la production de biocarburants est limité car ceux-ci sont produits à partir de résidus agricoles/forestiers.</p> <p>L'impact des monocultures énergétiques dédiées à la production de biocarburants (tel le miscanthus) sur la biodiversité est encore inconnu.</p> <p>Par ailleurs, la production de l'électricité nécessaire à la production des PtL et de l'hydrogène consommés dans les différents scénarios nécessite des installations de production d'électricité supplémentaires par rapport à celles actuelles (dans un contexte d'augmentation de la demande globale en électricité). Par conséquent, les consommations de PtL et d'hydrogène contribuent à l'artificialisation des terres et influent donc négativement sur la biodiversité [224].</p>
Efficacité énergétique – amélioration des opérations	Faible	L'amélioration des opérations permet de limiter les impacts locaux sur la biodiversité : la diminution du temps de roulage, des temps d'attente au sol, le <i>taxiage</i> autonome électrique induisent par exemple une baisse des nuisances sonores et des pollutions atmosphériques au niveau des pistes. Par ailleurs, l'étude et la valorisation de la biodiversité sur les emprises des aéroports s'améliore de manière tendancielle grâce aux nombreuses actions mises en place aujourd'hui par ces derniers. C'est notamment la vocation de la démarche HOP ! Biodiversité, devenue Aéro Biodiversité, qui a pour objectifs d'évaluer la biodiversité des aéroports, d'identifier les bonnes pratiques et de promouvoir une gestion des espèces plus naturelle et respectueuse de la biodiversité [130] [131].

Tableau 36 : Analyse de l'impact des différents scénarios sur l'enjeu "Préserver et renforcer la biodiversité et les services écosystémiques"

Levier(s) correspondant(s)	Poids du levier sur l'enjeu	Niveau d'incidence probable des caractéristiques du scénario							
		S0 - Détail	S0- Synthèse	SA - Détail	SA- Synthèse	SB - Détail	SB- Synthèse	SC - Détail	SC- Synthèse
Maîtrise du trafic	Modéré	--	-	-	--	+	-	0	-
Report modal	Modéré	0		0		--		-	
Utilisation de biocarburants et de PtL	Fort	0		--		-		-	
Amélioration des opérations	Faible	+		++		+		+	

#### 5.2.2.3.4. Enjeu 4 : Limiter les émissions de polluants atmosphériques, préserver la qualité de l'air extérieur et limiter l'exposition des populations aux pollutions de l'air – *Enjeu Important*

Tableau 37 : Analyse de l'impact des différents leviers de décarbonation du secteur aérien sur l'enjeu "Pollution de l'air"

Levier(s) correspondant(s)	Poids du levier sur l'enjeu	Justification / impact
Maîtrise du trafic	Fort	Les émissions de polluants sont directement liées à la quantité de carburants consommés. Ainsi, plus le trafic est important, plus les émissions de polluants atmosphériques augmentent. L'augmentation du trafic induit également une augmentation de la surface des aéroports, et donc une augmentation de la population exposée aux pollutions atmosphériques (liées aussi bien au trafic aérien qu'aux accès aux aéroports). L'évolution des émissions liées aux accès aux aéroports est à incertaine au vu des évolutions attendues dans le secteur routier (remplacement du parc thermique par un parc électrique moins émetteur localement)
Report modal	Modéré	Le report modal au bénéfice d'un mode de transport peu carboné (principalement le train), permet de limiter l'émission de polluants atmosphérique via son fonctionnement à l'électricité peu carbonée en France.
Utilisation d'hydrogène	Modéré	L'utilisation d'hydrogène comme carburant (soit en combustion directe soit en pile à combustible) permet d'émettre quasi uniquement de l'eau lors de la phase de vol de l'avion et limite donc les émissions d'autres polluants par rapport au kérosène lors de cette phase. La phase amont est considérée comme peu émissive dans les scénarios [15].
Utilisation de biocarburants et de PtL	Faible	Les émissions de NOx, de sulfates et de suie seraient moindres lors de la combustion de CAD que lors de la combustion de kérosène. A noter que l'impact exact de l'utilisation de CAD sur les émissions de polluants atmosphériques est toujours en cours de recherche [225].
Efficacité énergétique - amélioration de la consommation	Modéré	Les choix technologiques effectués pour augmenter l'efficacité énergétique impactent différemment les types émissions de polluants associés aux types de moteurs. Par exemple, une augmentation du taux de dilution permet de baisser les émissions, le choix des températures de combustion impactet les polluants rejetés...  Indépendamment de ces choix, les baisses de consommation de carburants conduisent à une baisse proportionnelle des émissions associées. Les progrès technologiques permettent ainsi de diminuer les émissions de polluants atmosphériques dans tous les scénarios.[15]
Efficacité énergétique - amélioration des opérations	Modéré	L'optimisation des trajectoires au vol et au sol permet de limiter les consommations de carburants au niveau des aéroports, et donc la pollution atmosphérique à proximité de ceux-ci.



Tableau 38 : Analyse de l'impact des différents scénarios sur l'enjeu "Pollution de l'air"

Levier(s) correspondant(s)	Poids du levier sur l'enjeu	Niveau d'incidence probable des caractéristiques du scénario							
		S0 - Détail	S0- Synthèse	SA - Détail	SA- Synthèse	SB - Détail	SB- Synthèse	SC - Détail	SC- Synthèse
Maîtrise du trafic	Fort	--	-	-	+	++	++	0	+
Report modal	Modéré	0		0		++		+	
Utilisation d'hydrogène	Modéré	0		+		0		+	
Utilisation de biocarburants et de PtL	Faible	0		+		++		+	
Amélioration de la consommation	Modéré	+		++		+		+	
Amélioration des opérations	Modéré	+		++		+		+	

### 5.2.2.3.5. Enjeu 5 : Limiter les nuisances sonores – Enjeu Important

Tableau 39 : Analyse de l'impact des différents leviers de décarbonation du secteur aérien sur l'enjeu "Limiter les nuisances sonores"

Levier(s) correspondant(s)	Poids du levier sur l'enjeu	Justification / impact
Maîtrise du trafic	Fort	La quantité de trafic est directement liée aux nuisances sonores engendrées lors de la phase de vol et dans les aéroports, mais aussi lors de l'accès aux aéroports (principalement via le transport routier).
Report modal	Modéré	En cas de report modal vers le train, les nuisances sonores associées sont plus importantes : elles impactent non seulement les riverains des gares mais aussi les riverains de toutes les lignes du Réseau Ferré National. Cette nuisance sera amplifiée si la croissance de trafic est telle que de nouveaux réseaux doivent être développés ou la fréquence de circulation augmentée. En cas de report modal vers le transport routier électrique (la mobilité thermique est exclue car peu bénéfique sur les émissions de CO <sub>2</sub> ), la nuisance est diminuée.
Efficacité énergétique - amélioration de la consommation	Modéré	Les modifications dans les moteurs utilisés peuvent avoir un impact positif sur le bruit. Par exemple l'augmentation du taux de dilution ainsi que l'utilisation de turbopropulseurs (moins consommateurs) à la place de turboréacteurs diminue le bruit. Néanmoins cet impact est à analyser précautionneusement car les choix des technologies qui seront intégrés aux futurs modèles ne sont pas encore réalisés et dépendent d'arbitrages à venir (entre les nuisances sonores, les émissions de GES, ou encore la vitesse des vols). Il s'agira en effet de s'assurer que les normes sonores continueront à se renforcer même en cas de rupture technologique. Cette analyse estime qu'au moins une partie des arbitrages sera probablement réalisée en faveur d'une diminution des nuisances sonores au vu des demandes actuelles des populations [89].
Efficacité énergétique - amélioration des opérations	Modéré	L'optimisation des trajectoires au vol et au sol permet de limiter les nuisances sonores : diminution du temps de présence des avions auprès des aéroports, du temps de roulage, procédures d'approche, électrification des engins au sol...

Tableau 40 : Analyse de l'impact des différents scénarios sur l'enjeu "Limiter les nuisances sonores"

Levier(s) correspondant(s)	Poids du levier sur l'enjeu	Niveau d'incidence probable des caractéristiques du scénario							
		S0 - Détail	S0- Synthèse	SA - Détail	SA- Synthèse	SB - Détail	SB- Synthèse	SC - Détail	SC- Synthèse
Maîtrise du trafic	Fort	--	--	-	0	++	++	0	+
Report modal	Modéré	0		0		-		-	
Amélioration de la consommation	Modéré	0		+		+		+	
Amélioration des opérations	Modéré	+		++		+		+	

### 5.2.2.3.6. Enjeu 6 : Limiter l'exposition des populations aux risques technologiques – Enjeu Modéré

Tableau 41 : Analyse de l'impact des différents leviers de décarbonation du secteur aérien sur l'enjeu "Limiter l'exposition des populations aux risques technologiques"







Levier(s) correspondant(s)	Poids du levier sur l'enjeu	Justification / impact
Utilisation d'hydrogène	Modéré	L'hydrogène est un gaz volatile et inflammable. Si de l'hydrogène gazeux réagit avec de l'air dans un milieu confiné, il peut s'enflammer à plus basse température que le kérosène. La gestion des risques associés à l'utilisation d'hydrogène (liquide ou gazeux) est donc à anticiper dès la conception des avions à propulsion à hydrogène.
Efficacité énergétique – amélioration de la consommation	Faible	Afin de s'assurer d'un maintien de la sécurité aérienne, les nouvelles technologies font l'objet de certifications exigeantes. C'est notamment le cas pour l'introduction de nouveaux moteurs ou nouvelles avancées technologiques.  Le développement de nouvelles technologies pour l'aviation ne devrait donc pas, a priori, détériorer la sécurité au bord des aéronefs grâce à leur conformité obligatoire aux certifications et réglementations existantes (qui ont par ailleurs tendance à se renforcer).

Tableau 42 : Analyse de l'impact des différents scénarios sur l'enjeu "Limiter l'exposition des populations aux risques technologiques"

Levier(s) correspondant(s)	Poids du levier sur l'enjeu	Niveau d'incidence probable des caractéristiques du scénario							
		S0 - Détail	S0- Synthèse	SA - Détail	SA- Synthèse	SB - Détail	SB- Synthèse	SC - Détail	SC- Synthèse
Utilisation d'hydrogène	Modéré	0	0	-	-	0	0	-	-
Amélioration de la consommation	Faible	0		0		0		0	

### 5.2.3. Synthèse des impacts par scénarios

La Figure 97 résume l'analyse de l'impact des scénarios sur les différents enjeux environnementaux :

Enjeux environnementaux	Enjeux environnementaux Sous-catégories	Niveau d'enjeu	S0 Scénario de référence	SA Rupture technologique	SB Modération trafic	SC Scénario Tous leviers	Principaux leviers discriminants
 Atténuer le changement climatique	Réduire les effets hors CO2 : autres GES, trainées de condensation, aérosols..	Majeur	-	+	++	+	Maitrise trafic Efficacité énergétique
 Qualité et artificialisation des sols et paysages	Préserver la qualité des sols	Important	-	--	-/--	-	Report modal CAD
	Limiter la consommation d'espaces naturels agricoles et forestiers	Important					
	Préserver la qualité paysagère	Modéré					
 Biodiversité	Préserver et renforcer la biodiversité et les services écosystémiques	Modéré	-	--	-/--	-	Maitrise trafic CAD
 Pollution de l'air	Limiter les émissions de polluants atmosphériques et préserver la qualité de l'air extérieur et limiter l'exposition des populations aux pollutions de l'air	Important	-	+	++	+	Maitrise trafic Report modal Efficacité énergétique
 Bruit	Limiter les nuisances sonores	Important	--	0	+	+	Maitrise trafic Efficacité énergétique
 Risques technologiques	Limiter l'exposition des populations aux risques technologiques	Modéré	0	-	0	-	Hydrogène

Légende :

++

Effets positifs majeurs

0

Effets neutres

--

Effets négatifs majeurs

+

Effets positifs limités

-

Effets négatifs limités

-/--

Effets négatifs à quantifier plus précisément

Figure 97 : Synthèse de l'analyse des autres impacts environnementaux des scénarios

Il est important de noter qu'aucun scénario ne permet de limiter l'intégralité des impacts de l'aviation sur les différents enjeux environnementaux. En effet, en fonction du niveau d'activation des différents leviers, chaque scénario a des impacts positifs et négatifs par rapport à certains enjeux.

Néanmoins, force est de constater que le scénario de référence ne présente que des effets négatifs sur la quasi-intégralité des enjeux.

Le **scénario A** « Rupture technologique » obtient deux scores positifs (changement climatique et pollution de l'air) et un score neutre (pour le bruit), malgré une hausse du trafic. Ce scénario a un impact négatif fort sur l'enjeu qualité, artificialisation sols et des paysages et sur l'enjeu biodiversité du fait des changements d'affectation des terres qu'il induit (qui sont eux-mêmes directement causés par l'augmentation du trafic et indirectement par la production de CAD). Ce scénario est le moins favorable en ce qui concerne la réduction des nuisances sonores.

Le **scénario B** « Modération du trafic » obtient les meilleurs scores vis-à-vis de la réduction des effets hors CO<sub>2</sub>, de la pollution de l'air et des nuisances sonores en raison de la diminution de la quantité de trafic. Ce scénario a cependant un impact négatif sur les paysages, les sols et la biodiversité à cause des changements d'affectation des sols liés à la production de CAD (cultures spécifiques produire des biocarburants et/ou installations électriques pour produire des PtL). Le **scénario B** peut également avoir un impact négatif sur les paysages, les sols et la biodiversité si les mesures de report modal conduisent à la construction de nouvelles infrastructures de transport (pour des modes de transports moins carbonés que l'avion), et plus particulièrement de nouvelles liaisons ferroviaires. L'impact de ce scénario sur ces trois enjeux devra donc faire l'objet d'études supplémentaires pour pouvoir être quantifié plus précisément.

Le **scénario C** « Tous leviers » permet de réduire les effets hors CO<sub>2</sub>, la pollution de l'air et les nuisances sonores liées aux secteurs aériens notamment grâce aux progrès technologiques (moteurs, CAD...), mais a un impact négatif sur les paysages, les sols et la biodiversité à cause des changements d'affectation des sols liés notamment à la production des CAD et de l'hydrogène bas-carbone consommés par les avions.

**Enseignement n°17** : Une augmentation du trafic peut induire, notamment si elle n'est pas modérée, une artificialisation des sols, en raison de l'extension des aéroports existants. La réduction de l'intensité carbone du mix énergétique est un levier qui génère également de l'artificialisation, en raison du développement des installations de production électrique et/ou des cultures spécifiques nécessaires à la production des CAD et de l'hydrogène bas-carbone embarqués dans les avions.

La trajectoire de décarbonation du secteur aérien basée sur la réduction du trafic aérien à court terme et une croissance modérée du trafic à moyen et long terme est la trajectoire qui minimise le plus certains impacts environnementaux du secteur aérien entre 2020 et 2050 (effets hors CO<sub>2</sub>, pollution de l'air, nuisances sonores). L'impact négatif de cette trajectoire sur les paysages, les sols et la biodiversité devra faire l'objet d'études supplémentaires pour pouvoir être quantifié plus précisément.

Le levier de la modération / réduction du trafic est le levier associé aux plus grands bénéfices environnementaux dans le cadre de la transition bas-carbone du secteur aérien.

Cet enseignement serait très probablement amplifié si l'analyse était effectuée sur un périmètre élargi au tourisme (tous motifs) lié au transport aérien.

## 5.3. Analyse des impacts socio-économiques des scénarios

### 5.3.1. Méthode

Cette partie de l'étude concerne l'estimation des retombées socio-économiques, en termes de chiffre d'affaires, valeur ajoutée et emplois des scénarios de transition du secteur aérien à l'échelle de la France. L'évolution de l'activité du secteur selon les différents scénarios aura en effet des conséquences socio-économiques, directement liées à l'évolution du trafic de personnes et de marchandises. Plusieurs types d'impacts socio-économiques sont étudiés au sein de cette analyse :

- **Les impacts directs** : concernant les acteurs directs des filières étudiées ;
- **Les impacts indirects** : concernant les fournisseurs des acteurs au sein des filières étudiées ;
- **Les impacts induits** : liés aux dépenses des employés des filières étudiées (salaires) ;
- **Les impacts catalytiques** : liés à l'activité générée par les dépenses des touristes voyageant par avion.



Il est important de noter que les impacts qui pourraient résulter d'un report des dépenses consacrées à des voyages par avion sur d'autres secteurs économiques (autres modes de transport et autres activités) se situent au-delà des différents périmètres d'impacts listés ci-dessus, et ne sont donc pas comptabilisés.

Il est également important de noter que le périmètre des activités de l'ensemble de ces quatre types d'impacts est différent du périmètre d'activités qui a été retenu dans le cadre de cette étude pour l'évaluation des impacts environnementaux.

Deux méthodes complémentaires sont employées pour évaluer ces impacts, qui se basent toutes deux sur les résultats des scénarios en termes d'évolution du trafic (passagers et fret).

1. **Méthode au périmètre élargi** : cette première approche s'appuie sur les travaux du rapport de l'Air Transport Action Group (ATAG) [1] qui estime, au niveau de la France, les quatre types d'impacts (directs, indirects, induits et catalytiques) pour l'ensemble du secteur aérien (Figure 98). Les ratios calculés au sein de ce rapport pour l'année 2019 (nombre d'emplois / volume de trafic, chiffre d'affaires / volume de trafic et valeur ajoutée / volume de trafic) sont supposés constants entre 2020 et 2050 et sont appliqués aux scénarios de la présente étude, permettant d'obtenir une estimation des retombées socio-économiques pour les années 2030, 2040 et 2050. Cette approche présente l'avantage d'un périmètre élargi (ensemble du secteur aérien) et permet également l'évaluation des quatre types d'impacts.
2. **Méthode d'analyse entrées-sorties** : afin de préciser les résultats de l'analyse, une seconde approche est employée. Cette méthode est appliquée à un périmètre restreint, c'est-à-dire aux trois branches appartenant aux « métiers de l'aérien » : transport aérien de passagers, transport aérien de fret et services auxiliaires des transports aériens. Seuls les impacts socio-économiques en termes d'emplois directs et indirects des scénarios sont évalués à l'aide de cette méthode, des données nationales ESANE de l'INSEE [226] et d'une analyse entrées-sorties. Cette dernière permet d'évaluer les emplois indirects liés à l'évolution du trafic aérien dans les différents scénarios, en tenant compte des relations entre secteurs économiques via les consommations intermédiaires. Elle repose sur l'utilisation d'un tableau entrées-sorties, document clé de la comptabilité nationale qui représente les flux de biens et de services (appelés produits) entre secteurs d'activité. L'avantage de cette méthode est qu'elle permet d'obtenir des résultats plus détaillés quant à la répartition sectorielle des impacts socio-économiques directs et indirects des scénarios. La Figure 99 présente les étapes de l'analyse entrées-sorties employée pour cette présente étude.

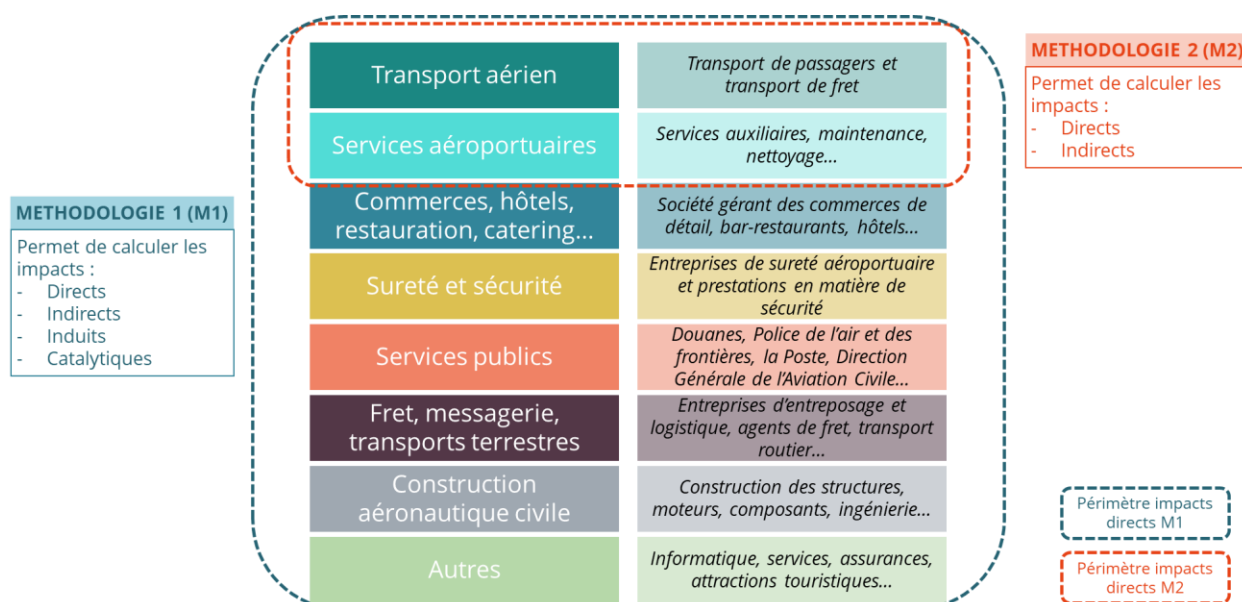


Figure 98 : Périmètre des deux méthodes employées pour l'estimation des retombées économiques du secteur aérien (périmètre des impacts directs pour les deux méthodes, servant de base au calcul des impacts indirects, induits et catalytiques).

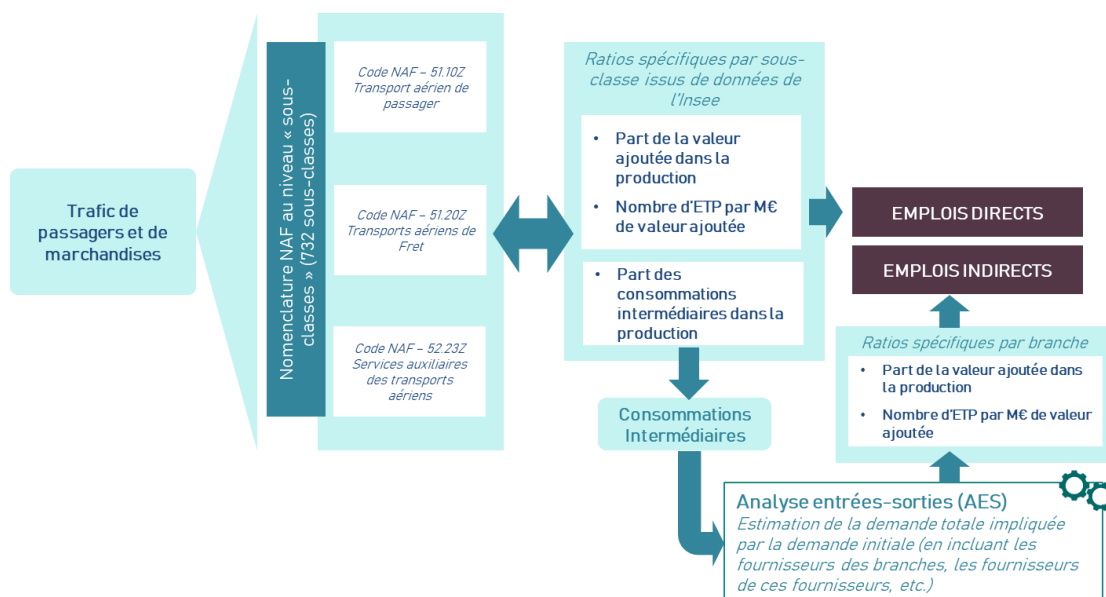


Figure 99 : Approche d'évaluation du contenu en emplois des scénarios grâce à une « analyse entrées-sorties »

Il est important de noter que les calculs d'emplois par les deux méthodes sont directement basés sur les évolutions du trafic, qui prennent en compte l'effet prix. Ce dernier est bien intégré de manière indirecte dans les évaluations d'emplois.

Les deux approches présentent toutes deux des avantages et inconvénients (Tableau 43). Ces deux méthodes présentent également certaines limites communes, qu'il convient de présenter. Premièrement, elles se basent toutes deux sur les évolutions du volume de trafic aérien en France dans les différents scénarios de transition. Ce volume est supposé avoir un effet direct linéaire sur l'activité économique du secteur, ce qui constitue une hypothèse difficilement vérifiable pour l'ensemble du périmètre analysé. Une analyse plus approfondie du secteur permettrait de collecter des données sur les dépenses des différentes filières au sein de l'ensemble du secteur aérien (transport et construction aéronautique), et ainsi de baser les scénarios sur cet indicateur d'évolution du secteur plus fiable que le trafic de passagers et marchandises. Par ailleurs, il est important de noter que les hypothèses économiques sur lesquelles sont basées les deux méthodes restent stables 2019 à 2050, ce qui constitue une limite de ces évaluations. Plus particulièrement, les structures de coûts restent inchangées aux horizons de temps futurs, une hypothèse forte au vu de l'évolution rapide et de la mutation des activités économiques telles que le secteur aérien.

Tableau 43 : Avantages et limites des deux approches employées pour l'estimation des retombées économiques

	Avantages	Limites
Méthode 1	<ul style="list-style-type: none"> <li>Permet une analyse des impacts sur l'ensemble du secteur aérien</li> <li>Permet d'appréhender tous les types impacts</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Risque de surestimation des impacts (hypothèse d'un effet linéaire du trafic aérien sur l'activité des filières de la construction)</li> </ul>
Méthode 2	<ul style="list-style-type: none"> <li>Permet d'obtenir des résultats détaillés dans la répartition sectorielle des impacts</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Périmètre restreint (seulement 3 branches du secteur aérien, ne prend pas en compte l'impact sur la construction aéronautique)</li> </ul>

### 5.3.2. Résultats

Nous présentons dans cette partie les résultats des retombées socio-économiques obtenus grâce aux deux méthodes décrites ci-dessus.

#### 5.3.2.1. Méthode au périmètre élargi

Comme décrit ci-dessus, la première méthode employée permet d'évaluer les retombées socio-économiques des scénarios sur l'ensemble du secteur aérien, et pour les quatre types d'impacts socio-économiques

considérés dans cette étude. En 2019, la valeur ajoutée (VA) générée par l'ensemble du secteur en France s'élève à 100,9 milliards d'euros, et le nombre d'emplois soutenus à 1,1 millions d'ETP. Les scénarios impliquent une évolution de la VA, entre 83 (scénario B) et 116 (scénario O) milliards d'euros de VA totale en 2030, et entre 88 (scénario B) et 192 (scénario O) milliards d'euros de VA totale en 2050, comme le montre la Erreur ! Source du renvoi introuvable.. Plus particulièrement :

- Le **scénario B** s'accompagne d'une stabilisation du nombre d'emplois et de la valeur ajoutée du secteur aérien, reflétant la stabilisation du trafic aérien entre 2023 et 2050 à laquelle il conduit. Dans ce scénario, la France continue à contribuer à l'amélioration de l'efficacité énergétique de la flotte mondiale en exportant des avions performants. La croissance du secteur de la construction aéronautique française dépendra du volume d'avions exportés, et donc des efforts de modération de trafic consentis par les autres pays.
- Le **scénario A** présente une hausse de la VA pour l'ensemble du secteur entre 2019 et 2050, du fait de l'augmentation du trafic sur cet horizon temporel, le levier technologique étant mis en avant de manière prioritaire.
- Le **scénario C** présente une hausse régulière de l'activité économique, inférieur à celle des scénarios O et A du fait du recours à la modération du trafic.

La plus grande part (35%) des impacts socio-économiques du secteur aérien dans les différents scénarios de transition sont directs, et sont ainsi liés à la VA au sein des branches de la chaîne de valeur du secteur aérien dans son intégralité, comme présenté au sein de la Erreur ! Source du renvoi introuvable..

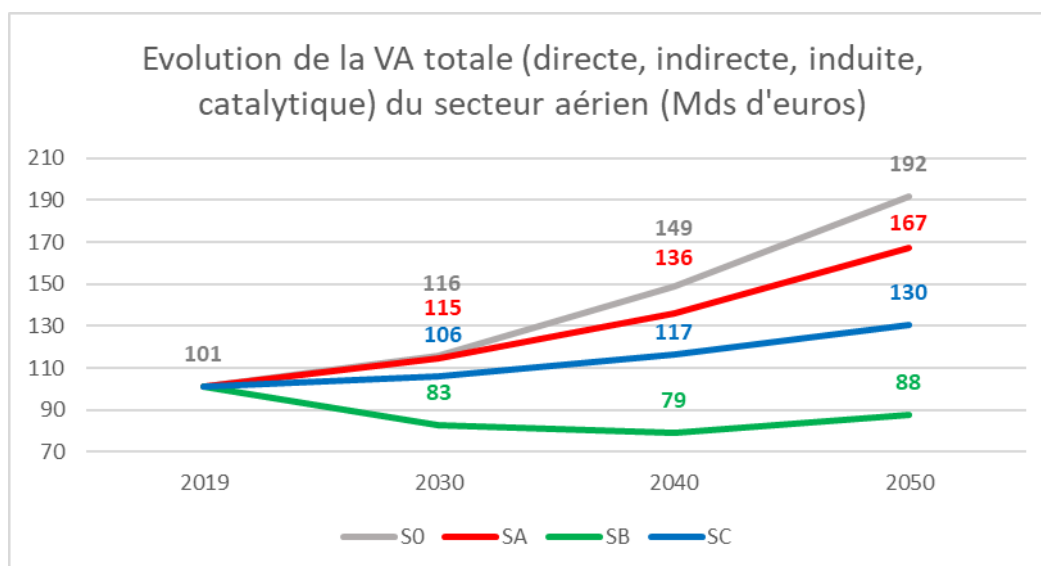


Figure 100 : Evolution de la valeur ajoutée totale générée par les scénarios pour l'intégralité du secteur aérien (périmètre sectoriel élargi)

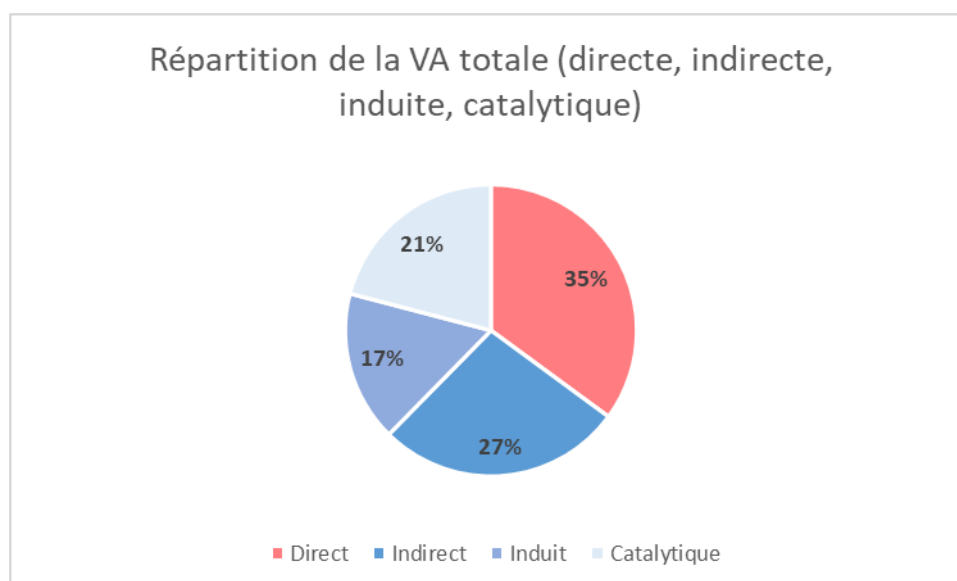


Figure 101 : Répartition de la valeur ajoutée totale (périmètre sectoriel élargi)

Les différents scénarios impliquent également le maintien d'emplois sur le territoire français, entre **913 000 (scénario B)** et **1,3 millions d'ETP (scénario 0)** en 2030, et entre **971 000 (scénario B)** et **2,1 millions (scénario 0)** d'ETP en 2050. De même que pour la valeur ajoutée, les emplois générés sont principalement directs et indirects.

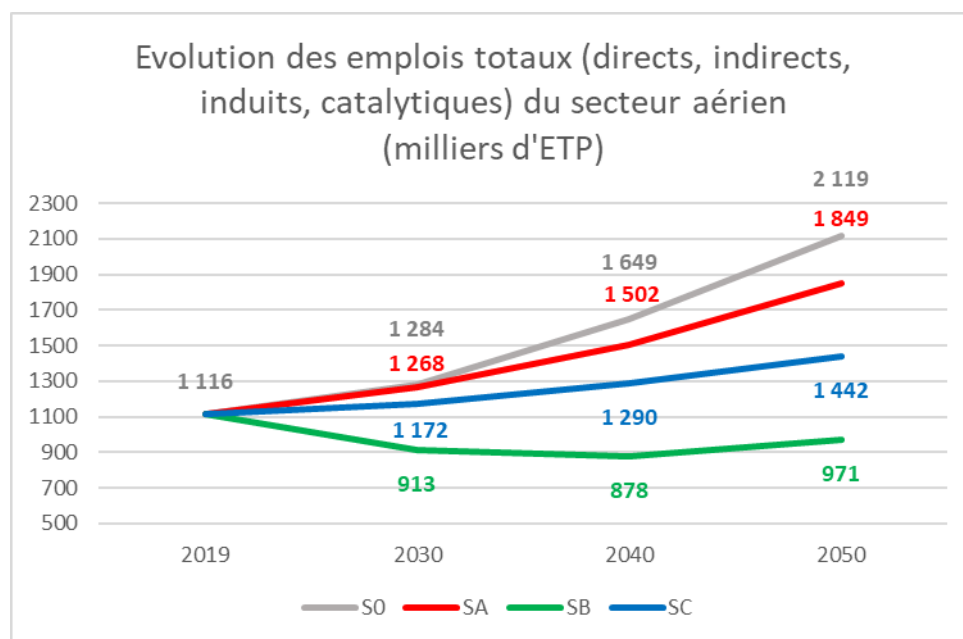


Figure 102 : Evolution des emplois totaux générés par les scénarios pour l'intégralité du secteur aérien et répartition par type d'impact (périmètre sectoriel élargi)

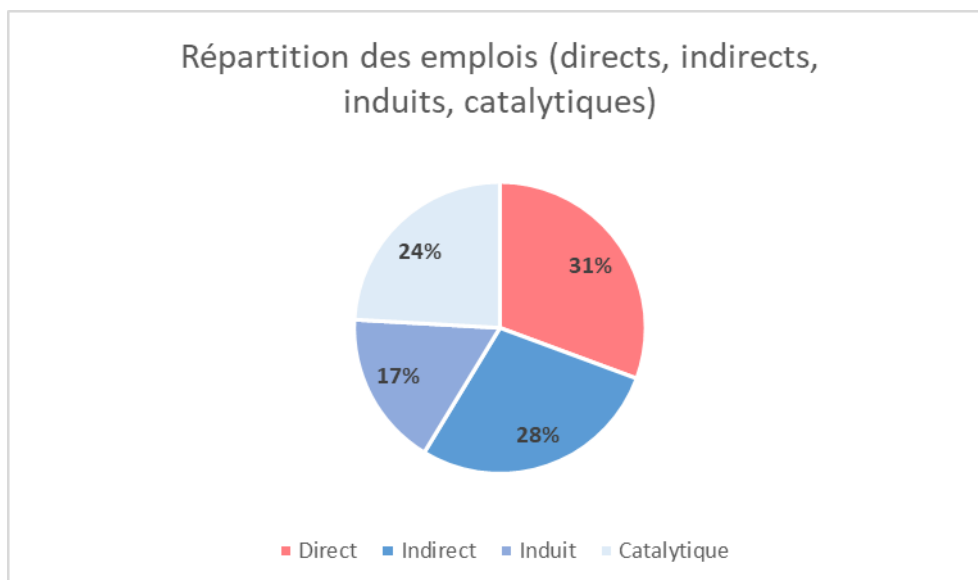


Figure 103 : Répartition des emplois (périmètre sectoriel élargi)

### 5.3.2.2. Méthode au périmètre restreint

Les résultats de cette partie concernent un périmètre du secteur aérien plus restreint que ceux présentés dans la partie précédente (voir Tableau 43). De la même façon que pour les résultats obtenus grâce à la méthode précédente, l'évolution de l'activité économique dans les différents scénarios de transition est proportionnelle à celle du trafic aérien de passagers et de marchandises. **En 2019, le secteur aérien génère un chiffre d'affaires de 79 milliards d'euros, une valeur ajoutée de 32 milliards d'euros et soutient 362 000 emplois.** Le secteur aérien présente une évolution **de 65 et 92 milliards de chiffres d'affaires en 2030 et entre 70 et 152 milliards d'euros de chiffres d'affaires en 2050.** De par la valeur ajoutée liée à ce chiffre d'affaires, le secteur soutient **entre 297 000 à 417 000 emplois en 2030 et entre 317 000 et 692 000 emplois en 2050.** Ces chiffres sont cohérents avec ceux obtenus grâce à la première méthode, puisque le périmètre de calcul initial est ici restreint (moins de filières prises en compte) et que seuls les emplois directs et indirects sont déterminés. Il est néanmoins possible d'obtenir une analyse plus

fine des impacts calculés, permettant de connaître la ventilation détaillée de ces emplois directs et indirects dans les branches de métiers. Trois-quarts des emplois directs et indirects maintenus en 2050 concernent le secteur des transports dans tous les scénarios (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Les emplois restants sont principalement générés au sein des services (tertiaire et services publics), principalement en lien avec les emplois indirects.

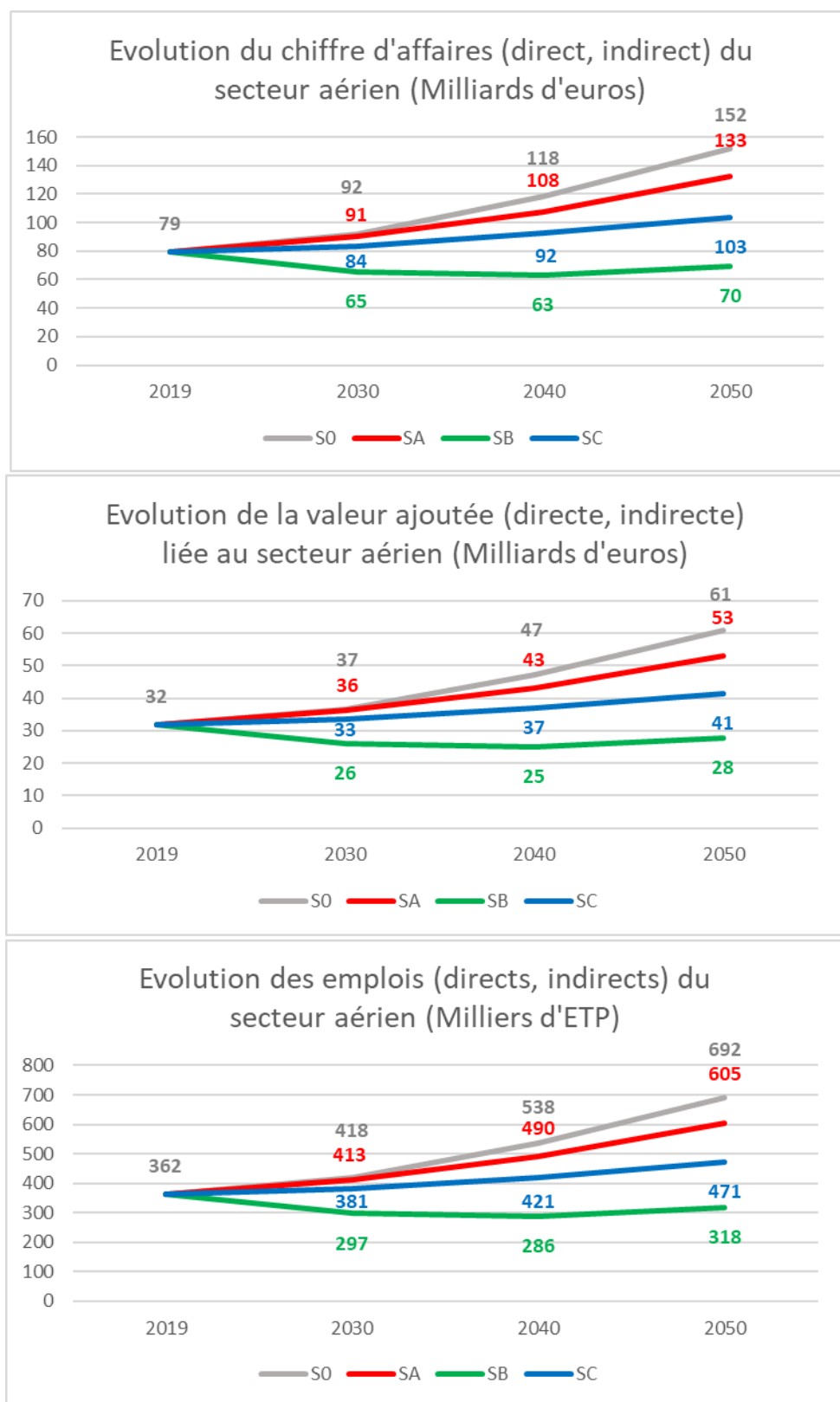


Figure 104 : Evolution du chiffre d'affaires, de la valeur ajoutée et des emplois générés (périmètre sectoriel restreint)



### Répartition du chiffre d'affaires (a) de la valeur ajoutée (b) et des emplois du secteur aérien entre direct et indirect

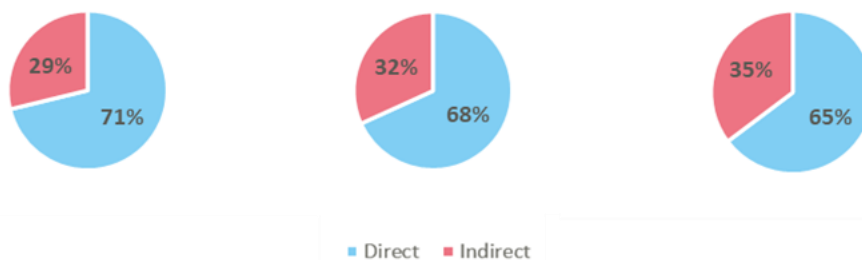


Figure 105 : Répartition sectorielle des emplois directs et indirects générés par la mise en œuvre des scénarios en 2050

### Répartition sectorielle des emplois totaux du secteur aérien en 2050

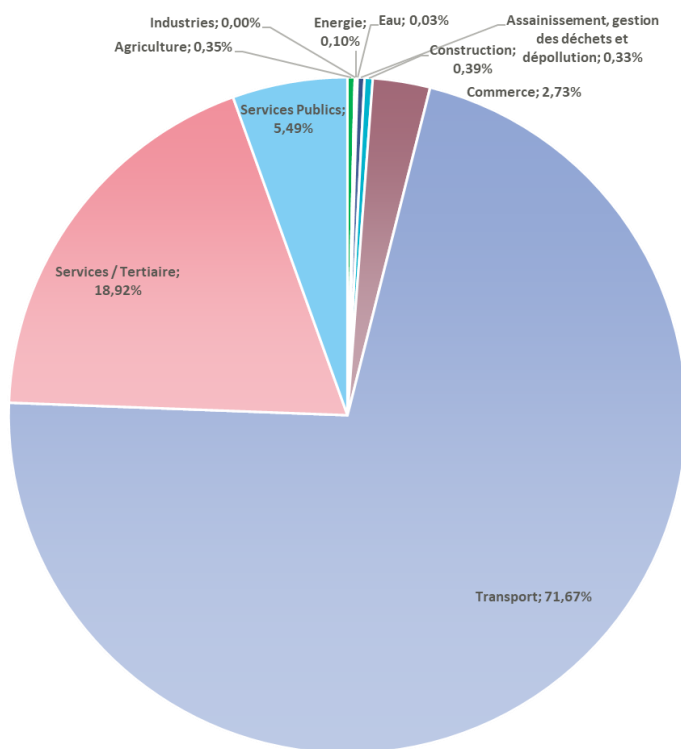


Figure 106 : Répartition sectorielle des emplois du secteur aérien en 2050

**Enseignement n°18 :** Si le levier de la réduction ou de la modération du niveau de trafic est activé et qu'il conduit à une stabilité de celui-ci par rapport à son niveau de 2019, cela n'engendre pas d'impact significatif sur la filière, dont l'activité reste relativement stable (scénario B) ou est en hausse (scénario C).

Il est intéressant de mettre en parallèle les emplois générés par le secteur aérien avec l'intensité carbone du secteur aérien en France, et de réaliser une comparaison avec le secteur ferroviaire. Afin de garantir une homogénéité des sources bibliographiques et de périmètre, nous nous basons sur les chiffres du CGDD (2021) [226]. Les transports ferroviaires de voyageurs et de fret comptabilisaient en 2019 158 000 salariés, contre 64 000 pour le secteur aérien (les chiffres divergent par rapport aux résultats présentés plus haut du fait d'une différence de périmètre pris en compte). Les émissions des secteurs ferroviaire et aérien représentent respectivement 0,4 MtCO<sub>2</sub>eq et 5,4 MtCO<sub>2</sub>eq (vols intérieurs, émissions hors amont) en 2019 [227]. Ainsi, si l'on calcule l'intensité carbone des emplois de ces deux secteurs, pour le périmètre défini, on obtient environ 2,5 tonnes CO<sub>2</sub> / emploi salarié pour le secteur ferroviaire, contre 84 tonnes CO<sub>2</sub> / emploi salarié pour le secteur aérien. Ce dernier permet donc de soutenir et de générer de

nombreux emplois, comme le montre l'évaluation des différents scénarios, mais il est à noter que ces emplois sont aujourd'hui associés à une activité plus carbonée que d'autres modes de transports collectifs, et notamment le transport ferroviaire.

Ce constat est encore valable dans les scénarios à l'horizon 2050. En effet, les intensités carbone des emplois du secteur aérien restent bien supérieures à celles actuelles des emplois du secteur ferroviaire, alors que ces dernières devraient très probablement baisser d'ici 2050 (du fait de l'électrification de certaines lignes de trains régionaux et de la baisse de l'intensité carbone du mix énergétique).

Tableau 44 : Intensités carbone des emplois du secteur aérien en 2050 dans les scénarios de transition

	S0	SA	SB	SC
Nombre d'emplois dans le transport aérien en 2050 <sup>89</sup>	120 059	103 191	54 087	80 749
Emissions liées au trafic intérieur – hors amont – avec effets prix (MtCO <sub>2</sub> )	5,6	1,0	0,6	1,3
Intensité carbone des emplois considérés du secteur aérien en 2050 (tCO <sub>2</sub> / emploi)	46	9	11	16

<sup>89</sup> Pour obtenir ces chiffres, on fait l'hypothèse que le nombre d'emploi du secteur aérien est directement proportionnel à la quantité de trafic, ce qui est une bonne approximation comme expliqué précédemment.

## 6. MISE EN ŒUVRE DES SCENARIOS

---

### 6.1. Introduction

Les transitions décrites dans les 3 scénarios de transition écologique du secteur aérien de cette étude (**scénario A** « Rupture technologique », **scénario B** « Modération du trafic » et **scénario C** « Tous leviers ») ne pourront se faire sans la mise en œuvre de mesures concrètes permettant de diminuer les impacts du secteur. Ces mesures doivent être mises en place aussi bien par les pouvoirs publics que par des acteurs privés, comme les compagnies aériennes, les aéroports, les constructeurs aéronautiques ou les agences de tourisme.

L'étude a permis d'identifier 10 familles de mesures :

- Rehaussement de l'ambition des objectifs climatiques nationaux et internationaux relatifs au secteur aérien ;
- Accompagnement à la diversification des activités des acteurs du secteur et à la reconversion professionnelle ;
- Réduction et/ou modération du trafic aérien des Français ;
- Réduction et/ou modération du trafic aérien des étrangers vers et depuis la France ;
- Report modal vers des modes de transport moins émetteurs ;
- Amélioration de l'efficacité énergétique des flottes et augmentation du taux de remplissage des avions ;
- Amélioration des opérations en vol et au sol ;
- Intégration de carburants moins émetteurs dans les avions ;
- Décarbonation des aéroports ;
- Compensation des émissions résiduelles.

Cet ensemble de mesures n'est pas exhaustif ; il s'agit de propositions qui ont vocation à être approfondies par des études complémentaires afin d'étudier plus précisément leur faisabilité, en particulier dans le cadre des travaux en cours sur la Stratégie Française Energie-Climat (SFEC).

La France a déjà commencé à mettre en œuvre certaines mesures identifiées : Appel à projets national « Développement d'une filière de production française de carburants aéronautiques durables » (2021-2022), Plan de soutien à l'aéronautique (2020), articles de la loi Climat & Résilience. Parallèlement, les acteurs de la construction aéronautique poursuivent leurs travaux pour apporter des solutions technologiques permettant de réduire les émissions du secteur. D'autres mesures sont par ailleurs en cours de discussion à l'échelle européenne (directive Refuel EU, réforme de l'UE ETS...) et mondiale (mécanisme CORSIA...).

L'ambition, le contenu, le rythme de mise en œuvre et l'importance des investissements financiers et humains associés à la mise en place de mesures supplémentaires par rapport à aujourd'hui conditionneront leur efficacité et les gains d'émissions. A noter que certaines mesures ou familles de mesures ne sont sollicitées que par certains scénarios. Ainsi, les mesures de réduction et de modération du trafic ne sont par exemple pas mobilisées dans le **scénario A**.

## 6.2. Mesures de mises en œuvre identifiées

### 6.2.1. Mesures de rehaussement de l'ambition des objectifs climatiques nationaux et internationaux relatifs au secteur aérien

Rehausser l'ambition des objectifs environnementaux publics nationaux et internationaux et des objectifs privés relatifs au secteur aérien	
Contexte et enjeux :	De plus en plus d'institutions publiques et privés (comme l'IATA [13] <sup>90</sup> ou l'OACI [11] <sup>91</sup> ), d'Etats (comme le Royaume-Uni [229]), et d'acteurs privés (comme Air France [230]) prennent des engagements environnementaux pour réduire les impacts environnementaux du secteur aérien. Ces objectifs sont néanmoins d'ambition variables, ne couvrent le plus souvent par tous les impacts du secteur, et ne sont pas encore pris par tous les acteurs du secteur. Ils ont donc vocation à être généralisés, contraignants et à voir leur périmètre élargi et leur ambition rehaussée.
Détail application dans les scénarios	Cette famille de mesures n'est pas mobilisée en tant que telle dans nos scénarios qui ne visent pas d'objectifs établis de diminution des impacts du secteur.
Objectifs	Augmenter l'ambition et élargir le périmètre des objectifs environnementaux existants relatifs au secteur aérien, tant au niveau national qu'international, et encourager tous les acteurs du secteur à adopter des objectifs ambitieux
Exemple de mesures/directives existantes	<ul style="list-style-type: none"> <li>Engagements de l'IATA [13], de OACI [11], du Royaume-Uni ou encore d'Air France[230].</li> <li>Déclaration de Toulouse [20].</li> </ul>
Exemples de mesures supplémentaires qui pourraient être mises en œuvre	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Réglementaires :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Obligation de planification de trajectoire bas carbone de tous les acteurs du secteur hors compensation.</li> </ul> </li> <li><b>Economiques :</b> il s'agit principalement d'incitations financières permettant de rehausser l'ambition des objectifs climatiques <ul style="list-style-type: none"> <li>Conditionner les aides publiques et les Crédit d'Impôt Recherche des entreprises à un plan de développement de l'avion propre ;</li> <li>Augmenter le périmètre couvert par les objectifs, notamment en incluant les NOx dans les objectifs quantitatifs via une incitation économique (instaurer une taxe sur les NOx ou les inclure dans le marché carbone européen par exemple) ;</li> </ul> </li> <li><b>Institutionnelles :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Renforcement des objectifs fixés par l'OACI et les Etats aujourd'hui et adoption de nouveaux objectifs : défendre la nécessité d'un budget carbone de l'aérien sur la scène internationale et le négocier ; inclure les émissions liées aux vols internationaux dans les comptabilité GES et les stratégies nationales (par exemple dans la SNBC) ; éviter la confusion entre les émissions du secteur et la comptabilisation des mécanismes de marché (« compensation » carbone, EU-ETS, CORSIA) ; adopter des objectifs sur les impacts environnementaux du secteur (pollution de l'air et bruit notamment) ; élargir le périmètre des objectifs climatiques à l'ensembles des GES (NOx notamment) ; délaissier l'objectif national annuel de « 100 millions de touristes internationaux » pour aller vers d'autres indicateurs (nombre de nuitées notamment) ;</li> <li>Renforcement des objectifs adoptés par les différentes associations du secteur (IATA par exemple) ;</li> <li>Renforcement et/ou adoption de nouveaux objectifs environnementaux par les compagnies aériennes ;</li> <li>Programme de formation de différents organismes (CNFPT, les syndicats...) afin d'accompagner les techniciens des offices de tourisme et des comités régionaux du tourisme dans l'intégration des enjeux climatiques en particulier dans les destinations et en intégrant un plafond écologique et une trajectoire bas carbone de leur activité.</li> </ul> </li> <li><b>De sensibilisation :</b></li> </ul>

<sup>90</sup> Organisation Internationale du Transport Aérien

<sup>91</sup> Organisation de l'Aviation Civile Internationale

Rehausser l'ambition des objectifs environnementaux publics nationaux et internationaux et des objectifs privés relatifs au secteur aérien		
		<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Développement d'outils publics permettant de justifier les choix d'objectifs : outils open-source d'aide à la décision pour orienter les décisions à l'échelle de l'OACI ; outils de modélisation des trajectoires du trafic aérien libres et open-source ;</li> </ul> <p>Mise en place d'outils de mesure communs pour intégration de nouveaux objectifs : accord sur une métrique commune pour les effets des traînées de condensation ; évaluation des émissions hors CO<sub>2</sub> comme le NO<sub>x</sub> ou le bruit.</p>
Lien avec d'autres secteurs		<p>Les autres secteurs directement impliqués sont les secteurs de la formation initiale et professionnelle et du tourisme plus globalement. Néanmoins tous les secteurs économiques peuvent être impliqués par la hausse de leurs objectifs climatiques par un effet mimétique.</p>
Acteurs concernés		Instituts de recherche, Etat (notamment CNFPT), Institutions Européennes, professionnels et écoles du tourisme, syndicats, organes de communication (journalisme...), compagnies aériennes, consommateurs...
Gains attendus	Impact GES	Le renforcement et l'élargissement des objectifs climatiques existants et l'adoption de nouveaux objectifs devrait permettre de faire baisser les émissions de GES du secteur.
	Autres impacts environnementaux	Le renforcement et l'élargissement des objectifs environnementaux existants et l'adoption de nouveaux objectifs devrait permettre de faire diminuer les impacts du secteur, notamment ceux liés à la pollution de l'air, au bruit et à la biodiversité.
	Impacts socio-économique	Le rehaussement des ambitions nationales et internationales sur la transition climatique du secteur aérien peut avoir des impacts négatifs ou positifs sur l'activité de ce secteur, en fonction des leviers mobilisés pour effectuer cette transition (voir Parties 6.2.3 à 6.2.10).
	Autres impacts	Le rehaussement des objectifs sur ce secteur pourrait avoir une influence indirecte sur le rehaussement d'objectifs d'autres secteurs et d'autres pays par mimétisme ou par exemplarité.
Limites / obstacles identifiés		<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Impacts économiques :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ La hausse des objectifs demandera nécessairement des efforts plus importants de la part des différents acteurs du secteur ce qui peut avoir des conséquences économiques importantes.</li> </ul> </li> <li>• <b>Acceptabilité :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Risque de répercussion des efforts à fournir sur le prix des billets ;</li> <li>○ Difficultés à convaincre les entreprises du tourisme de faire pivoter leur modèle en intégrant potentiellement de nouveaux risques et des difficultés dans la conduite du changement.</li> </ul> </li> <li>• <b>Effets de fuite :</b> En cas d'adoption de cette mesure par un pays uniquement (comme la France), ceci peut conduire à une fuite des vols vers les pays frontaliers, moins exigeants, ou la fragilisation des hubs français.</li> </ul>
Mesures permettant de lever les obstacles		<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Sur l'acceptabilité :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Communication et sensibilisation des consommateurs sur l'impact de l'aérien justifiant ces objectifs ;</li> <li>○ Mise en place d'une réglementation pour imposer les virages des entreprises du secteur.</li> </ul> </li> <li>• <b>Sur les effets de fuite :</b> Accord avec les pays frontaliers a minima sur le rehaussement de mesures similaires à l'international (et en Europe).</li> </ul>

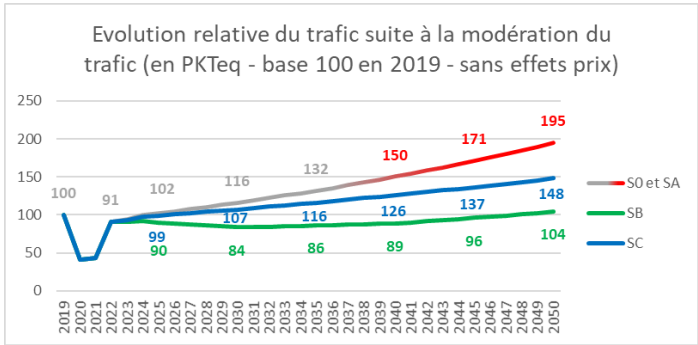


## 6.2.2. Mesures d'accompagnement à la diversification des activités des acteurs du secteur et à la reconversion professionnelle

Accompagner la diversification des activités des acteurs du secteur et la reconversion professionnelle				
Contexte et enjeux :	<p>La maîtrise du trafic aérien, qu'elle soit liée à une politique publique de réduction ou de modération du trafic, à une augmentation des coûts de transport ou à des changements de comportements des passagers, a, de fait, des conséquences sur le marché de l'emploi lié au secteur aérien.</p> <p>Afin de rendre le secteur plus résilient face à une baisse d'activité, deux leviers sont proposés :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Encourager les acteurs du secteur aérien à se diversifier en développant de nouvelles activités aux connaissances/compétences proches de celles présentes chez leurs employés ;</li> <li>• Accompagner une partie des employés de ce secteur dans une reconversion professionnelle vers un emploi à impact environnemental positif.</li> </ul> <p>Dans cette logique, il s'agit d'analyser en détail les activités liées aux différents emplois directs et indirects du secteur (transport aérien, aéroports, constructeurs...). En effet, chacun de ces emplois est associé à des compétences différentes qui peuvent être valorisées dans le cadre de reconversion professionnelles.</p> <p>Par exemple, 40 % des employés du secteur ont des activités indirectement lié au transport aérien qui peuvent être directement transférées à d'autres secteurs d'activité (vente, RH...). Par ailleurs, une partie des emplois directement liés au transport aérien pourraient également être transférés. Le personnel navigant commercial, qui représentent 22 % des emplois du secteur, pourrait ainsi mettre relativement facilement ses compétences au service d'autres modes de transports [15].</p>			
Détail application dans les scénarios		Scénario 0	Scénario A	Scénario B
		Non concerné (augmentation du trafic).	Non concerné (augmentation du trafic).	Scénario concerné par ces mesures du fait de la diminution probable du trafic entre 2023 et 2040.
Objectifs	<p>Limitier les impacts négatifs sur l'emploi de la stabilisation de la quantité de trafic aérien, dans le cas du <b>scénario B</b>.</p>			
Exemple de mesures/directives existantes	<p>Aucune mesure n'a été trouvée à ce sujet. Des collectifs ont néanmoins proposé des mesures sur le sujet, c'est notamment le cas de Pensons l'Aéronautique de Demain [157]</p>			
Exemples de mesures supplémentaires qui pourraient être mises en œuvre	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Institutionnelles :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Etude des transversalités entre les compétences des emplois liés à l'aérien et d'autres secteurs ;</li> <li>○ Création d'un fonds européen pour le développement de l'aviation durable.</li> </ul> </li> <li>• <b>Economiques :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Accompagnement financier de la transition des acteurs économiques concernés par la reconversion ;</li> <li>○ Incitation économique à la diversification des entreprises et requalifications des salariés de ces acteurs.</li> </ul> </li> <li>• <b>De sensibilisation :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Campagne de sensibilisation aux conséquences environnementales des différents secteurs et de revalorisation des postes à impact positif.</li> </ul> </li> </ul>			
Lien avec d'autres secteurs	<p>Ces mesures sont directement à relier avec les besoins en main d'œuvre et compétences associés avec la transition bas-carbone française. Ainsi, la</p>			

Accompagner la diversification des activités des acteurs du secteur et la reconversion professionnelle		
		France doit par exemple aujourd'hui renforcer certaines filières essentielles pour sa transition, comme celles de la rénovation énergétique des bâtiments, la construction de véhicules ou de batteries électriques ou l'installation d'énergies renouvelables.
Acteurs concernés		Etat, Organismes de communication, Institutions Internationales, Acteurs du secteur
Gains attendus	Impact GES	L'impact sur les émissions de GES est indirect et peut plutôt être comptabilisé dans les gains des autres mesures.
	Autres impacts environnementaux	L'impact sur l'environnement est indirect et peut plutôt être comptabilisé dans les gains des autres mesures.
	Impacts socio-économique	Impacts positifs sur l'emploi notamment grâce à l'augmentation de la résilience du secteur à d'éventuelles crises impactant brutalement le trafic aérien (comme illustré par la crise du COVID-19) sans nécessiter des investissements étatiques massifs.  La réorientation des emplois vers de nouveaux secteurs moins émetteurs (notamment l'ensemble des fonctions support, le personnel naviguant, les agents de maintenance, les gestionnaires du trafic etc.) impliquera des hausses d'effectifs au sein de ces secteurs, sous réserve de formations professionnelles adaptées. Il faut également envisager la revalorisation des infrastructures aéroportuaires, zones d'activités riches en emplois.
	Autres impacts	NA
Limites / obstacles identifiés		<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Impacts économiques</b> : un effort financier est attendu de la part de tous les acteurs du secteur.</li> <li>• <b>Acceptabilité</b> : réel enjeu de travail sur la perception de cette mesure qui peut être appréhendée comme une contrainte mais permet d'atténuer les répercussions d'autres mesures.</li> <li>• <b>Effets de fuite</b> : <ul style="list-style-type: none"> <li>○ La diversification des emplois du secteur aérien sur le sol français ne doit pas se faire au profit d'acteurs étrangers qui captureraient les parts de marchés abandonnées par les acteurs français ;</li> <li>○ Par ailleurs, la reconversion professionnelle n'est pertinente que si elle s'oriente vers un secteur/des activités émettant moins de carbone ou s'inscrivant dans la logique de la transition énergétique.</li> </ul> </li> </ul>
Mesures permettant de lever les obstacles		Voir « Exemples de mesures supplémentaires qui pourraient être mises en œuvre ».

### 6.2.3. Mesures de réduction et/ou de modération du trafic aérien des Français

Réduire et/ou modérer le trafic aérien des Français	
Contexte et enjeux :	<p>Les français prennent de plus en plus l'avion. Le nombre de passagers (français et étrangers) transportés par an en France a été multiplié par 5 entre 1980 et 2020 [31], l'aéroport de Paris Charles de Gaulle étant le 9<sup>ème</sup> aéroport mondial en termes de passagers [1].</p> <p>Aujourd'hui, les émissions de CO<sub>2</sub> du secteur aérien sont positivement corrélées au niveau de trafic. Ainsi, les émissions de GES du trafic aérien lié à la France en 2019 ont augmenté de +4 % par rapport à 2018 et de +85% par rapport à 1990, et ce en lien avec l'augmentation du trafic. Ces émissions représentaient environ 15 % des émissions liées au transport en France (total national complété par les transports maritimes et aériens internationaux) [7].</p> <p>Selon l'ADEME, 60 % des français partant à l'étranger utilisaient l'avion avant la crise sanitaire pour parcourir en moyenne 3600 km aller-retour. Un voyageur partant à l'étranger émettait donc en moyenne environ 5 fois plus d'émissions par nuitée qu'un voyageur restant en France [231].</p> <p>A titre d'illustration, selon les hypothèses fournies par la DGAC au mois de novembre 2021; celui-ci devrait poursuivre sa croissance dans les prochaines décennies, si aucune action de modération ou de réduction du trafic n'est prise. Selon ces projections, dans le <b>scénario 0</b>, le trafic pourrait augmenter de +2,7 % par an pour les vols internationaux et entre la Métropole et l'Outre-mer ainsi que de +1,2 % par an en moyenne pour les vols intérieurs métropolitains jusqu'en 2050.</p> <p>Dans son rapport annuel 2022, le Haut Conseil pour le Climat formule cette recommandation : « Le secteur aérien doit engager sa décarbonation par la maîtrise de la demande. » [19].</p>
Détail application dans les scénarios	<p>Dans les <b>scénarios B et C</b>, les mesures de réduction puis de modération du trafic s'appliquent à tous les vols et à tous les passagers de manière indifférente, qu'ils soient Français ou étrangers. Leurs effets en termes de baisse de trafic sont donc des effets globaux, qui dans la réalité seraient différenciés entre les passagers Français et étrangers.</p>  <p>Figure 107 Evolution relative du trafic suite à la réduction et à la modération du trafic (en PKTeq - base 100 en 2019 - sans effets prix)</p>
Objectifs	Réduire de manière globale le trafic aérien des Français
Exemple de mesures/directives existantes	Loi Climat et Résilience (2021) : suppression des liaisons aériennes en cas d'accès possible en moins de 2h30 en train, interdiction de certains projets d'extension d'aéroports [119].
Exemples de mesures supplémentaires qui pourraient être mises en œuvre	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Réglementaires :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Interdiction des vols disposant d'une alternative de transport peu carbonée sur une durée de transport acceptable ;</li> <li>○ Inclusion des voyages d'affaires dans les Plans de Déplacement des Entreprises et modération de tout ou partie des allers-retours en avion dans une même journée pour des motifs professionnels ;</li> </ul> </li> </ul>

Réduire et/ou modérer le trafic aérien des Français		
		<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Refonte des programmes de fidélité, notamment ceux des voyageurs d'affaires pour en limiter l'usage personnel ;</li> <li>○ Mise en place de la « frequent flyer levy » : une taxe progressive sur la fréquence des usages des voyageurs qui impacterait davantage les voyageurs qui voyagent fréquemment ;</li> <li>○ Modération de tout ou partie de la publicité pour les voyages en avion et des slogans revendiquant une solution écologique sans vérification ;</li> <li>○ Baisse du nombre de créneaux de vols disponibles pour les compagnies aériennes ;</li> <li>○ Modification de la gestion des congés afin d'encourager les voyages plus lents et plus longs ;</li> <li>○ Eviter les courts séjours en général.</li> <li>• <b>Economiques :</b> ces mesures visent uniquement à faire baisser la demande par l'augmentation du prix du transport pour les consommateurs. <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Non renouvellement des lignes low-cost sur certains aéroports ;</li> <li>○ Augmentation du prix du billet d'avion via différentes méthodes : retour sur l'exonération de la TICPE<sup>92</sup> sur le kérosène et élargissement aux vols intérieurs, augmentation des taxes sur les billets d'avion (TVA<sup>93</sup> à 20%) et sur le carburant pour l'aviation de loisir...</li> <li>○ Appui financier au tourisme local et bas carbone.</li> </ul> </li> <li>• <b>De sensibilisation :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Communications autour de l'impact environnemental de l'avion ;</li> <li>○ Exemplarité de l'Etat (limitation de l'utilisation de l'avion par les élus et le gouvernement) ;</li> <li>○ Développement d'outils d'aide au changement de comportement pour inciter à la diminution des trajets longue distance ;</li> <li>○ Développement de mesure de sensibilisation dans les entreprises avec notamment une incitation à la réduction des voyages d'affaire ;</li> <li>○ Mesures encourageant les voyages plus lents et plus longs en cas de voyages longues distances.</li> </ul> </li> <li>• <b>Influence internationale :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Influence au sein de l'organisation mondiale du tourisme (UNWTO) pour changer la notion de performance d'une destination touristique et faire évoluer le classement mondial hors du nombre de touristes internationaux.</li> <li>○ Instauration d'une TVA sur les billets d'avions internationaux à l'échelle européenne ;</li> <li>○ Mise en place de dispositifs de protection contre les fuites carbone et les distorsions de concurrence résultant de politiques de décarbonation nationales supérieures au reste du monde (mécanisme « d'ajustement aux frontières »).</li> </ul> </li> </ul>
Lien avec d'autres secteurs		Lien avec le secteur du tourisme - en particulier avec les agences de voyages françaises et internationales et avec l'UNWTO (Organisation Mondiale du Tourisme).
Acteurs concernés		Etat (DGAC <sup>94</sup> pour le secteur aérien, DGE <sup>95</sup> pour le tourisme...), entreprises, syndicats, compagnies aériennes, tour-opérateurs, agences de voyages, plateformes de tourisme, aéroports, collectivités territoriales...
Gains attendus	Impact GES	La réduction et la modération du trafic sont donc des leviers majeurs de réduction des émissions de GES du secteur aérien puisque la quantité d'émission est durablement corrélée à la quantité de trafic (Partie 5.1.2).
	Autres impacts environnementaux	<p>La réduction et la modération du trafic permet de réduire largement tous les autres impacts environnementaux indésirables causés par le secteur aérien (Partie 5.2.1.3) :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Baisse des effets hors CO<sub>2</sub> impactant le changement climatique (traînées de condensation, aérosols.) ;</li> </ul>

<sup>92</sup> Taxe intérieure de consommation sur les produits énergétiques

<sup>93</sup> Taxe sur la valeur ajoutée

<sup>94</sup> Direction Générale de l'Aviation Civile

<sup>95</sup> Direction Générale des Entreprises

Réduire et/ou modérer le trafic aérien des Français		
		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Artificialisation des sols et préservation de la qualité paysagère (en limitant la construction ou l'extension d'aéroports);</li> <li>• Impacts sur la biodiversité aux aéroports des infrastructures aéroportuaires;</li> <li>• Pollution de l'air (en limitant les polluants liés à la combustion);</li> <li>• Nuisances sonores pour riverains (aux abords des aéroports);</li> <li>• ...</li> </ul>
	Impacts socio-économique	<p>La réduction ou la modération du trafic des Français pourrait avoir des impacts négatifs sur le secteur, et pourrait entraîner une stagnation des emplois et de la valeur ajoutée générée par la filière (cas du <b>scénario B</b>). A la différence de la crise de la Covid-19 et de ses impacts pour l'année 2020 par rapport à 2019 (la réduction de -60 % du trafic au niveau français [88] s'est traduit par une baisse de -59 % du chiffre d'affaires d'Air France et une perte nette de 7,1 milliards d'euros pour la compagnie aérienne [64]), la planification de cette mesure pourrait permettre de gérer ces effets.</p> <p>Ces impacts négatifs pourraient en revanche être, au moins en partie, compensés par des impacts socio-économiques positifs dans d'autres secteurs d'activités comme le secteur du tourisme local en France. Une réduction ou une modération du trafic aérien en France à l'avenir pourrait ainsi se traduire par une relocalisation de l'activité touristique émissives (c'est-à-dire des français), et donc potentiellement par le développement touristique de régions ou territoires pour répondre à la demande touristique française, notamment si cette dernière ne vient pas se substituer et/ou s'ajouter exactement à la demande touristique étrangère.</p>
	Autres impacts	NA
Limites / obstacles identifiés		<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Acceptabilité :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ Complexité de mise en œuvre puisque ces mesures sont à l'encontre des intérêts socio-économiques du secteur aérien et du tourisme international;</li> <li>◦ Faible acceptabilité des voyageurs sur la « privation de liberté » et l'« écologie punitive » qu'ils pourraient associer à ces mesures;</li> <li>◦ Faible aptitude générale à faire évoluer sans contrainte ses propres comportements pour des raisons environnementales;</li> <li>◦ Risque d'augmenter le sentiment de transport inégalitaire si augmentation des prix (augmentation des inégalités sociales correspondantes).</li> </ul> </li> <li>• <b>Effets de fuite :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ Transfert modal des voyages en avion sur voyage en voiture individuelle (pollution équivalente en km/personne);</li> <li>◦ Report vers les aéroports frontaliers à la France si pas d'actions coordonnées à l'échelle de l'Union Européenne.</li> </ul> </li> <li>• <b>Autres :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ Respect du droit (notamment de la concurrence) français / européen.</li> </ul> </li> </ul>
Mesures permettant de lever les obstacles		<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Sur l'acceptabilité :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ Sensibilisation des publics, transparence et pédagogie : ces mesures ne visent pas à ne plus autoriser de prendre l'avion;</li> <li>◦ Engagement des professionnels du tourisme;</li> <li>◦ Maintien d'une certaine justice sociale dans l'implémentation des mesures (qui ne doivent pas être systématiquement plus pénalisante pour les moins aisés);</li> <li>◦ Accompagnement à la reconversion des emplois détruits dans le secteur aérien (voir Partie 6.2.2).</li> </ul> </li> <li>• <b>Sur les effets de fuite :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ Rehaussement des objectifs climatiques de l'Union Européenne vis-à-vis du secteur aérien (voir Partie 6.2.1);</li> <li>◦ Encouragement du report modal vers des modes de transport moins émetteurs (voir Partie 6.2.4);</li> <li>◦ Encouragement du développement de nouveaux modes de transport alternatifs (en temps équivalent) bas-carbone.</li> </ul> </li> </ul>



## 6.2.4. Mesures de réduction et/ou de modération du trafic aérien des étrangers vers et depuis la France

Réduire et/ou modérer le trafic aérien des étrangers vers et depuis la France	
Contexte et enjeux :	<p>La France est historiquement la première destination touristique mondiale en nombre d'arrivées de touristes internationaux avec plus de 89,3 millions de visiteurs en 2018 (pré covid) [231]</p> <p>Le tourisme en France (composé du tourisme intérieur et du tourisme des étrangers en France) pesait 11 % des émissions territoriales de GES françaises en 2018, et les déplacements en avions représentaient 41 % du bilan GES du secteur du tourisme en France à cette date. Par ailleurs, un visiteur étranger émettait en moyenne en 2018 quatre fois plus d'émissions de GES qu'un touriste métropolitain par nuitée en France métropolitaine [231].</p> <p>A titre d'illustration, selon les hypothèses fournies par la DGAC au mois de novembre 2021 ; celui-ci devrait poursuivre sa croissance dans les prochaines décennies, sans action de modération ou de réduction du trafic. Selon ces projections, dans le <b>scénario 0</b>, le trafic augmente de +2,7 % par an pour les vols internationaux.</p> <p>Dans son rapport annuel 2022, le Haut Conseil pour le Climat formule cette recommandation : « Le secteur aérien doit engager sa décarbonation par la maîtrise de la demande. » [19].</p>
Détail application dans les scénarios	Voir Partie 6.2.3.
Objectifs	Réduire le trafic des touristes internationaux vers et depuis France
Exemple de mesures/directives existantes	NA
Exemples de mesures supplémentaires qui pourraient être mises en œuvre	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Réglementaires :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Réglementation vers les opérateurs réceptifs du tourisme (ie ceux attirant les visiteurs étrangers en France) – Obligation de mesure carbone de leur attractivité ;</li> <li>○ Réduction du budget de promotion internationale des agences de tourisme ;</li> <li>○ Baisse du nombre de créneaux de vols disponibles pour les compagnies aériennes.</li> </ul> </li> <li>• <b>Institutionnelles :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Nouvelle ambition française en matière de promotion touristique : repenser l'ambition de 100 millions de touristes internationaux en vision plus durable (retombées économiques, plafond écologique, comptabilisation du nombre de nuitées, etc.) ;</li> <li>○ Evolution des schémas de développement touristique des Régions françaises et autres destinations infras pour réduire la part de marché de la clientèle internationale.</li> </ul> </li> <li>• <b>Economiques :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Harmonisation des taxes sur le kérosène au niveau Européen ;</li> <li>○ Taxation sur la non-application de la mesure carbone hors compensation.</li> </ul> </li> <li>• <b>De sensibilisation :</b> Promotion du tourisme de proximité pour les pays émetteurs.</li> <li>• <b>Influence internationale :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Influence au sein de l'organisation mondiale du tourisme (UNWTO) pour changer la notion de performance d'une destination touristique et faire évoluer le classement mondial hors du nombre de touristes internationaux.</li> <li>○ Instauration d'une TVA sur les billets d'avions internationaux à l'échelle européenne ;</li> <li>○ Mise en place de dispositifs de protection contre les fuites carbone et les distorsions de concurrence résultant de</li> </ul> </li> </ul>

Réduire et/ou modérer le trafic aérien des étrangers vers et depuis la France		
		politiques de décarbonation nationales supérieures au reste du monde (mécanisme « d'ajustement aux frontières »).
Lien avec d'autres secteurs		Voir Partie 6.2.3.
Acteurs concernés		<ul style="list-style-type: none"> <li>Etat: Ministère des Affaires Etrangères (secrétariat d'Etat au tourisme), Agence de tourisme (Atout France);</li> <li>Agences réceptives du tourisme, aéroports, Comités régionaux du tourisme, offices de tourisme.</li> </ul>
Gains attendus	Impact GES	Voir Partie 6.2.3.
	Autres impacts environnementaux	Voir Partie 6.2.3.
	Impacts socio-économique	<p>La réduction ou la modération du trafic des étrangers vers et depuis la France pourrait avoir des impacts négatifs sur le secteur, puisqu'elle impacterait non seulement les emplois directs du secteur, mais aussi les emplois indirects, induits et catalytiques (Partie 5.3.1). A la différence de la crise de la Covid-19 et de ses impacts pour l'année 2020 par rapport à 2019 (la réduction de -60 % du trafic au niveau français [88] s'est traduit par une baisse de -59 % du chiffre d'affaire d'Air France et une perte nette de 7,1 milliards d'euros pour la compagnie aérienne [64]), la planification de cette mesure pourrait permettre de gérer ces effets.</p> <p>Une réduction ou une modération du trafic des étrangers vers la France pourrait entraîner une baisse de l'activité de l'ensemble du secteur du tourisme en France. Cette baisse pourrait néanmoins être compensée par une hausse de l'activité touristique des Français sur le territoire.</p>
	Autres impacts	NA
Limites / obstacles identifiés		<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Impacts économiques :</b> réduction et/ou modération des retombées économiques pour certains territoires, perte d'emplois dans les destinations accueillant un nombre important de visiteurs internationaux ;</li> <li><b>Acceptabilité :</b> par les voyageurs, par les territoires touristiques en France ou par les agences réceptives ;</li> <li><b>Effets de fuite :</b> nécessité d'augmenter les durées moyennes de séjours pour optimiser <b>l'impact carbone du voyage</b>. Evolution des business model de certaines destinations.</li> </ul>
Mesures permettant de lever les obstacles		<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Sur l'acceptabilité :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Sensibilisation des publics et transparence ;</li> <li>Engagement des professionnels du tourisme ;</li> <li>S'assurer du maintien d'une certaine justice sociale dans l'implémentation des mesures (qui ne doivent pas être systématiquement plus pénalisantes pour les moins aisés).</li> </ul> </li> <li><b>Sur les effets de fuite :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Favoriser le report modal vers des modes de transport moins émetteurs (Partie 6.2.5) ;</li> <li>Implémentation d'un mécanisme d'ajustement carbone aux frontières (Partie 6.2.1) ;</li> <li>Favoriser le développement de nouveaux modes de transport alternatifs (en temps équivalent) bas carbone ;</li> <li>Promouvoir une mise en œuvre coordonnée avec des pays partenaires.</li> </ul> </li> </ul>

## 6.2.5. Mesures favorisant le report modal vers des modes de transport moins émetteurs

Favoriser le report modal vers des modes de transport moins émetteurs		
Contexte et enjeux :		<p>Les différents modes de transport n'ont pas les mêmes impacts sur le climat. En effet, selon l'ADEME (valeurs moyennes), le Train à Grande Vitesse émet 2 gCO<sub>2</sub>eq/pass.km contre 35 gCO<sub>2</sub>eq/pass.km pour les autocars, 138 gCO<sub>2</sub>eq/pass.km pour les avions court courrier (sans prise en compte des traînées) et 96,5 gCO<sub>2</sub>eq/pass.km pour les voitures particulières (avec 2 personnes à bord) [232].</p> <p>Par ailleurs, les temps de trajet sur le territoire national sont parfois assez proches, ce qui facilite l'acceptabilité du report modal.</p> <p>En effet à titre d'exemple, la mise en service de la LGV entre Paris et Bordeaux a provoqué un recul du trafic aérien de 17 % entre 2017 et 2018 sur la liaison entre ces deux villes alors que la SNCF revendique une hausse de 70 % du trafic passagers entre Paris et Bordeaux [117] sur la même période.</p> <p>Les mesures favorisant le report modal permettent donc de limiter l'impact du secteur du transport sur le climat sans pour autant modifier le mode de vie des voyageurs.</p>
Détail application dans les scénarios		Les scénarios prennent en compte l'impact de la loi Climat et résilience. Les effets des mesures encourageant le report modal sur le trafic sont intégrés dans ceux des mesures contribuant à la réduction et/ou modération du trafic.
Objectifs		Réduire la part modale de l'aérien au profit de modes de transports moins carbonés (par exemple transport ferroviaire ou transport routier via les véhicules électriques) tout en maintenant le nombre de voyages effectués.
Exemple de mesures/directives existantes		<ul style="list-style-type: none"> <li>Loi Climat : suppression des liaisons aériennes en cas d'accès possible en moins de 2h30 en train [119] ;</li> <li>Développement des trains de nuit en France.</li> </ul>
Exemples de mesures supplémentaires qui pourraient être mises en œuvre		<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Economiques :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Subvention des modes de transport alternatifs à l'avion (train de nuit, densification des liaisons interurbaines ferroviaires...) et d'équipements touristiques adaptés pour le train ;</li> <li>Financement de l'amélioration de la qualité de service dans les autocars interurbains et dans les trains interurbains ;</li> </ul> </li> <li><b>Institutionnelles :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Développement d'une filière d'autocars moins polluants ;</li> <li>Travail sur l'intermodalité de transports touristiques.</li> </ul> </li> <li><b>De sensibilisation :</b> publicité d'incitation à l'usage de modes moins polluants (train, covoiturage, autocar...) ;</li> <li><b>Influence internationale :</b> action politique / réglementaire à l'échelle européenne pour encourager la mise en place de mesures similaires à celles citées plus haut mais à l'échelle de l'Union Européenne.</li> </ul>
Lien avec d'autres secteurs		Liens avec le secteur du tourisme français, avec le secteur du transport.
Acteurs concernés		Etat, agences de tourisme, agence de publicité, institutions européennes, acteurs du secteur du transport routier et ferroviaire.
Gains attendus	Impact GES	Voir Partie 6.2.3.
	Autres impacts environnementaux	<p>Alors que l'impact climatique est nettement en faveur du report modal, les autres impacts environnementaux peuvent être <b>détériorés</b> par ces mesures.</p> <p>C'est notamment le cas de ceux liés aux emprises au sol des infrastructures (la construction de nouvelles lignes ferroviaires ou de nouveaux axes routiers représente une plus grande emprise sur les sols (et donc artificialisation induite) que les espaces aéroportuaires). De la même manière, la biodiversité peut être impactée plus fortement avec notamment une invasion de certains lieux de vie des espèces (les tracés de routes/lignes peuvent notamment pénétrer sur certaines zones protégées) (voir Partie 5.2.1.3 pour plus de détails).</p>

Favoriser le report modal vers des modes de transport moins émetteurs		
	Impacts socio-économique	Ces mesures font partie des mesures de reconversion professionnelle mentionnées en Partie 6.2.2. Elles pourraient ainsi permettre le maintien d'une partie des activités et emplois du secteur du tourisme en cas de diminution de la quantité de trafic, notamment si un accompagnement public fort en termes de formations professionnelles et d'investissements dans la régénération des infrastructures de transport est mise en place.
	Autres impacts	NA
Limites / obstacles identifiés		<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Acceptabilité :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Risque d'augmenter le sentiment de transport inégalitaire au vu de la tarification du train aujourd'hui bien plus élevée que celle de l'avion.</li> <li>○ Augmentation des prix des voyages (augmentation des inégalités sociales correspondantes);</li> <li>○ Problématique de la gestion des bagages, par exemple en cas de changement de gare à Paris, et du dernier kilomètre (intermodalité de transports).</li> </ul> </li> <li>• <b>Faisabilité :</b> enjeux autour de l'intermodalité entre les pays de l'usage du train avec meilleure lisibilité des offres.</li> <li>• <b>Autres impacts environnementaux :</b> voir ci-dessus « Autres impacts environnementaux » dans « Gains attendus ».</li> </ul>
Mesures permettant de lever les obstacles		<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Sur l'acceptabilité :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ S'assurer du maintien d'une certaine justice sociale dans l'implémentation des mesures (qui ne doivent pas être systématiquement plus pénalisantes pour les moins aisés);</li> <li>○ S'assurer d'une compétitivité économique entre les modes de transports encouragés et le secteur aérien.</li> </ul> </li> <li>• <b>Sur la faisabilité :</b> nécessité d'une coordination européenne sur la mise en avant de certains modes de transport ;</li> <li>• <b>Sur les autres impacts environnementaux :</b> Nécessité de prise en compte de ces enjeux dès la conception de nouveaux axes de transport afin de limiter l'impact potentiellement négatif du report modal.</li> </ul>

## 6.2.6. Mesures d'amélioration de l'efficacité énergétique des flottes et augmentation du taux de remplissage des avions

Améliorer l'efficacité énergétique des flottes et augmentation du taux de remplissage des avions											
Contexte et enjeux :	L'efficacité énergétique des avions peut être améliorée grâce à des innovations technologiques afin de permettre aux appareils de consommer moins de carburants par unité de transport et de limiter leurs impacts sur l'environnement.										
	Différentes pistes technologiques sont déjà identifiées pour permettre ces progrès. Ces pistes sont détaillées en Partie 3.3.  Les projections les plus optimistes estiment que cela permettrait d'obtenir des avions avec une efficacité énergétique 30 % plus élevée par rapport aux avions actuels.										
Détail application dans les scénarios	Le détail des hypothèses associées à ce levier est disponible en Partie 4.4.3.										
	<table><tr><th>Scénario 0</th><th>Scénario A</th><th>Scénario B</th><th>Scénario C</th></tr><tr><td>Levier non activée : pas de nouveaux avions, taux de renouvellement des flottes actuel : tous les 25 ans</td><td>Levier fortement activée :<ul style="list-style-type: none"><li>Premiers avions à hydrogène en 2035,</li><li>Gain de consommation élevés</li><li>Rythme de renouvellement des flottes accéléré</li></ul></td><td><ul style="list-style-type: none"><li>Levier faiblement activée :</li><li>Pas d'avions à hydrogène d'ici 2050 ;</li><li>Apparition d'un nouvel avion à kérosène en 2040</li></ul></td><td>Levier activé plus modestement que dans le scénario A : date de sortie des avions légèrement repoussée, gains plus faibles...</td></tr></table>	Scénario 0	Scénario A	Scénario B	Scénario C	Levier non activée : pas de nouveaux avions, taux de renouvellement des flottes actuel : tous les 25 ans	Levier fortement activée : <ul style="list-style-type: none"><li>Premiers avions à hydrogène en 2035,</li><li>Gain de consommation élevés</li><li>Rythme de renouvellement des flottes accéléré</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>Levier faiblement activée :</li><li>Pas d'avions à hydrogène d'ici 2050 ;</li><li>Apparition d'un nouvel avion à kérosène en 2040</li></ul>	Levier activé plus modestement que dans le scénario A : date de sortie des avions légèrement repoussée, gains plus faibles...		
Scénario 0	Scénario A	Scénario B	Scénario C								
Levier non activée : pas de nouveaux avions, taux de renouvellement des flottes actuel : tous les 25 ans	Levier fortement activée : <ul style="list-style-type: none"><li>Premiers avions à hydrogène en 2035,</li><li>Gain de consommation élevés</li><li>Rythme de renouvellement des flottes accéléré</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>Levier faiblement activée :</li><li>Pas d'avions à hydrogène d'ici 2050 ;</li><li>Apparition d'un nouvel avion à kérosène en 2040</li></ul>	Levier activé plus modestement que dans le scénario A : date de sortie des avions légèrement repoussée, gains plus faibles...								
Objectifs	<ul style="list-style-type: none"><li>Permettre au secteur d'améliorer les performances des avions existants ;</li><li>Accélérer le rythme de renouvellement des flottes pour intégrer rapidement ces améliorations.</li></ul>										
Exemple de mesures/directives existantes	Plan de soutien à l'aéronautique » de 2020 [16].										
Exemples de mesures supplémentaires qui pourraient être mises en œuvre	<ul style="list-style-type: none"><li>• <b>Réglementaire :</b><ul style="list-style-type: none"><li>◦ Interdiction des places en classe « Première » ou « Affaires »<sup>96</sup>.</li></ul></li><li>• <b>Economiques :</b><ul style="list-style-type: none"><li>◦ Incitation par des contreparties au renouvellement des flottes : éligibilité aux aides pour des « investissements verts » en cas de renouvellement ;</li><li>◦ Prime à la casse pour inciter au renouvellement de la flotte ;</li><li>◦ Investissements publics et privés (des constructeurs et des compagnies aériennes) dans la recherche et le développement de nouveaux avions plus efficaces ;</li><li>◦ Mise en place d'incitations économiques par les constructeurs à destination des compagnies aériennes pour les encourager à renouveler leurs flottes.</li></ul></li><li>• <b>Institutionnelles :</b><ul style="list-style-type: none"><li>◦ Développement d'une filière recyclage pour accélérer le renouvellement de flotte ;</li></ul></li></ul>										

<sup>96</sup> Selon l'IATA, un passager en classe « Première » (respectivement en classe « Affaires ») émet 5 fois (respectivement 4 fois) plus de CO<sub>2</sub> qu'un passager en classe « Economique » dans les avions gros porteurs (de plus de 250 places qui assurent généralement des long-courriers). Ce rapport est de 1,5 pour les avions monocouloir qui assurent en général des vols court et moyen-courriers [233, p. 1726].



Améliorer l'efficacité énergétique des flottes et augmentation du taux de remplissage des avions		
		<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Instauration de normes énergétiques sur les avions au niveau mondial.</li> <li>• <b>Autres :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Densification des cabines par les compagnies aériennes (diminution du nombre de sièges en classe « Première » ou « Affaires » )<sup>97</sup>.</li> </ul> </li> </ul>
Lien avec d'autres secteurs		NA
Acteurs concernés		Constructeurs, Compagnies aériennes, Instituts de recherche, Etat, Institutions Internationales
Gains attendus	Impact GES	L'amélioration de l'efficacité énergétique des flottes est un des deux leviers techniques majeurs de réduction des émissions du secteur aérien (Partie 5.1.3).
	Autres impacts environnementaux	L'amélioration des certains composants de l'avion peuvent avoir d'autres impacts environnementaux positifs: l'augmentation du taux de dilution des moteurs (Partie 3.3.1.1) permet une diminution du bruit, le développement d'une filière de recyclage permet une plus faible pression sur les ressources de matériaux, les baisses de consommation de carburants conduisent à une baisse proportionnelle des émissions associées et donc des polluants atmosphériques (voir Partie 5.2.2.3).
	Impacts socio-économique	Cette mesure permet d'augmenter de manière importante le nombre d'emplois créés dans le secteur : création d'emplois dans la recherche, dans les bureaux d'étude, dans les départements R&D de nouvelles filières industrielles, ainsi qu'au sein d'usines de ces filières. Cette mesure pourrait ainsi impliquer la structuration de filières innovantes au cœur de territoires français, permettant la création d'emplois locaux.
	Autres impacts	<p>Le positionnement de la France comme leader de la recherche dans ce secteur permettrait par ailleurs d'entretenir son rayonnement en tant que puissance internationale maîtrisant le développement de la filière.</p> <p>Le développement de ces technologies par la France permettrait d'embarquer d'autres pays dans leur décarbonation notamment les différents pays clients des constructeurs Français.</p>
Limites / obstacles identifiés		<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Impact économique :</b> La subvention de la recherche et l'accélération du renouvellement des flottes nécessitent un important effort financier qui pourrait éventuellement être réalisé aux dépens d'autres secteurs.</li> <li>• <b>Acceptabilité :</b> Le temps de trajet pourrait se trouver allongé via l'utilisation de différents systèmes de propulsion<sup>98</sup>, cet impact serait plus important pour les long-courriers. Par ailleurs, l'accélération du renouvellement des flottes avec des avions plus modernes pourrait entraîner une hausse des dépenses d'opération des compagnies aériennes, et donc du prix des billets.</li> <li>• <b>Effets de fuite :</b> L'allongement de temps de trajet risque d'inciter une fuite des émissions vers d'autres pays moins contraignants à ce sujet.</li> <li>• <b>Faisabilité :</b> Cette mesure repose sur des améliorations technologiques qui semblent probables mais nécessitent du temps afin de pouvoir être développées, testées, certifiées et déployées à large échelle.</li> <li>• <b>Risques technologiques :</b> le développement de nouvelles technologies doit s'inscrire dans le maintien de la sécurité aérienne. L'amélioration technologique doit donc être réalisée dans le cadre de cette conformité aux certifications et réglementation existantes (qui ont tendance à se renforcer).</li> </ul>

<sup>97</sup> Il s'agit plus précisément d'une mesure d'augmentation de la capacité d'emport des avions et non d'augmentation des taux de remplissage.

<sup>98</sup> Le recours à des turbopropulseurs permet par exemple d'augmenter le taux de dilution des moteurs et donc une amélioration de l'efficacité énergétique des avions, mais implique que les avions volent moins vite [15].

Améliorer l'efficacité énergétique des flottes et augmentation du taux de remplissage des avions	
Mesures permettant de lever les obstacles	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Effets de fuite :</b> des accords internationaux sur le sujet, à minima européens pourrait permettre de limiter les effets de fuite (Partie 6.2.1);</li> <li>• <b>Impacts économiques :</b> les aides à destination du secteur (nationales et européennes) pourraient être conditionnées à leur utilisation dans la recherche de l'amélioration énergétique.</li> </ul>

## 6.2.7. Mesures d'amélioration des opérations en vol et au sol

Améliorer les opérations en vol et au sol												
Contexte et enjeux :	<p>Indépendamment de l'efficacité énergétique des avions, différentes mesures peuvent être mises en place lors des vols afin de minimiser leur impact sur l'environnement. Ces mesures concernent deux catégories d'opérations :</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• <b>Les opérations en vol :</b> choix des trajectoires de vols – notamment les altitudes, les opérations lors de la phase d'approche de l'aéroport – mais aussi la limitation du fuel tankering<sup>99</sup> par exemple ;</li><li>• <b>Les opérations au sol :</b> notamment la réalisation des opérations de roulage (durée, engins au sol utilisés, activation des APU...) (voir Partie 3.3.2).</li></ul> <p>Les effets non-CO<sub>2</sub> des vols, notamment ceux liés au rejet de vapeur d'eau et à la formation des traînées de condensation, ont principalement lieu à certaines altitudes dans certaines conditions particulières (voir Partie 2.3.2). Il pourrait être possible de limiter drastiquement les effets non-CO<sub>2</sub> en intégrant ces paramètres dans le choix des trajectoires de vol.</p>											
Détail application dans les scénarios	<p>Le détail des hypothèses associées à ce levier est disponible en Partie 4.4.3.4</p> <table><tr><th>Scénario 0</th><th>Scénario A</th><th>Scénario B</th><th>Scénario C</th></tr><tr><td>Gain de 0,1% par an</td><td>Gain de 0,35% par an</td><td>Gain de 0,2% par an</td><td>Gain de 0,2% par an</td></tr></table>				Scénario 0	Scénario A	Scénario B	Scénario C	Gain de 0,1% par an	Gain de 0,35% par an	Gain de 0,2% par an	Gain de 0,2% par an
Scénario 0	Scénario A	Scénario B	Scénario C									
Gain de 0,1% par an	Gain de 0,35% par an	Gain de 0,2% par an	Gain de 0,2% par an									
Objectifs	<ul style="list-style-type: none"><li>• Optimiser les opérations de management du trafic aérien (ATM) afin de minimiser aussi bien la consommation de carburant que les impacts hors-CO<sub>2</sub> de la phase de vol ;</li><li>• Décarboner au maximum les opérations au sol au niveau des aéroports.</li></ul>											
Exemple de mesures/directives existantes	<p>Les différentes mesures permettant d'améliorer les opérations sont en majeure partie déjà en cours de mise en place aujourd'hui<sup>100</sup>.</p>											
Exemples de mesures supplémentaires qui pourraient être mises en œuvre	<ul style="list-style-type: none"><li>• <b>Réglementaires :</b><ul style="list-style-type: none"><li>◦ Modification de la trajectoire d'un nombre restreint de vols pour éviter les zones où se forment les traînées de condensation</li><li>◦ Mises en place de mesures pour rendre certaines actions obligatoires (restriction de l'usage des moteurs auxiliaires de puissance (APU), électrification de la climatisation)</li><li>◦ Interdiction du fuel tankering.</li></ul></li><li>• <b>Institutionnelles :</b><ul style="list-style-type: none"><li>◦ Adoption de l'initiative « Ciel Unique Européen » pour établir des règles communes et renforcer la coopération entre les centres de contrôle européen.</li></ul></li><li>• <b>Economiques :</b></li></ul>											

<sup>99</sup> Le « fuel tankering » ou « double emport » est une pratique des compagnies aériennes consistant à embarquer plus de carburant que nécessaire pour un vol lorsque le coût du carburant est moins élevé sur l'aéroport de départ que sur l'aéroport d'arrivée [15].

<sup>100</sup> A noter qu'une proposition de règlement européen sur le déploiement d'une infrastructure pour carburants alternatifs est en cours de discussion au Parlement Européen et au Conseil de l'Union Européenne dans le cadre du paquet législatif « Fit for 55 ». Cette proposition contient notamment un objectif intitulé « Objectifs pour la fourniture d'électricité aux aéronefs en stationnement » :

1. « Les États membres veillent à ce que les entités gestionnaires d'aéroports de tous les aéroports du réseau central et du réseau global du RTE-T assurent la fourniture d'électricité aux aéronefs en stationnement :
  - (a) au plus tard le 1er janvier 2025, à toutes les portes d'embarquement utilisées pour les opérations de transport aérien commercial ;
  - (b) au plus tard le 1er janvier 2030, à tous les postes de stationnement éloignés utilisés pour les opérations de transport aérien commercial.
2. À partir du 1er janvier 2030 au plus tard, les États membres prennent les mesures nécessaires pour veiller à ce que l'électricité fournie en vertu du paragraphe 1 provienne du réseau électrique ou soit produite sur place en tant qu'énergie renouvelable » [234].

Améliorer les opérations en vol et au sol		
		<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Soutien à la décarbonation des engins de piste et à la décarbonation de la phase de roulage (Electric Green Taxiing System).</li> <li>• <b>Autres :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Mise en œuvre des mesures aujourd'hui disponibles par les compagnies aériennes (formation des pilotes à l'éco-pilotage, limitation du fuel tankering, limitation du recours aux APU...);</li> <li>○ Mise en œuvre des mesures aujourd'hui disponibles par les aéroports (décarbonation de leurs flottes d'engins aux sols, électrification des emplacements de stationnement des avions...).</li> </ul> </li> </ul>
Lien avec d'autres secteurs		NA
Acteurs concernés		Compagnies aériennes, Aéroports, Etat, Institutions européennes, Pilotes
Gains attendus	Impact GES	Ces mesures permettent des gains progressifs et mesurés d'émissions de CO <sub>2</sub> (voir Partie 5.1.2.3).
	Autres impacts environnementaux	La modification des trajectoires de certains avions permettrait de réduire fortement les effets non-CO <sub>2</sub> de l'aviation et particulièrement la formation des traînées de condensation (voir Partie 5.2.1.3).
	Impacts socio-économique	Aucun impact socio-économique notable lié à cette mesure.
	Autres impacts	La mise en place de nouvelles opérations en France peut avoir des répercussions importantes au niveau international par effet de mimétisme ou d'influence.
Limites / obstacles identifiés		<b>Risques politiques/sécuritaires :</b> nécessité de coopération entre pays (et notamment Européens) concernant la gestion des opérations en vol entre pays
Mesures permettant de lever les obstacles		Prise de position d'institutions européennes sur le sujet du Ciel Unique Européen. A noter que le sujet est en cours de discussion au niveau Européen.

## 6.2.8. Mesures de baisse de l'intensité carbone du mix énergétique embarqué par les avions

Décarboner le mix énergétique embarqué par les avions												
Contexte et enjeux :	<p>Développer l'usage de Carburants d'Aviation Durables (CAD : biocarburants et électrocarburants) et d'hydrogène pourrait permettre de faire de baisser l'intensité carbone du mix énergétique utilisé par les avions si ces carburants sont produits de manière durable, c'est-à-dire à partir :</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• De résidus de culture et d'agroforesterie, de culture énergétique dédiée ou de déchets, pour les biocarburants (d'aviation durables) ;</li><li>• De CO<sub>2</sub> capté à la sortie d'installations industrielles et d'électricité faiblement carbonée (moins de 109 gCO<sub>2</sub>/kWh), pour les électrocarburants ;</li><li>• D'électricité faiblement carbonée (moins de 180 gCO<sub>2</sub>/kWh), pour l'hydrogène.</li></ul> <p>Les biocarburants et électrocarburants sont dits « drop-in » : ils ne nécessitent pas d'adaptation technologique des avions existants pour être incorporés jusqu'à 50% dans les flottes actuelles. L'hydrogène nécessite a priori le développement de nouveaux modèles pour pouvoir être utilisé dans les avions court, moyen et long-courriers, même si des solutions de retrofit avec des kits de conversion sont à l'étude pour les avions de petite taille assurant des vols « régionaux » de moins de 1000 km [235].</p>											
Détail application dans les scénarios	<p>Le détail des hypothèses associées à ce levier est disponible en Partie 4.4.2.</p> <table><tr><th>Scénario 0</th><th>Scénario A</th><th>Scénario B</th><th>Scénario C</th></tr><tr><td>Pas de CAD ni d'hydrogène</td><td>Recours très important aux CAD Développement d'un avion à hydrogène en 2035</td><td>Recours important aux CAD Pas d'avion à hydrogène</td><td>Recours significatif aux CAD Développement d'un avion à hydrogène en 2040</td></tr></table>				Scénario 0	Scénario A	Scénario B	Scénario C	Pas de CAD ni d'hydrogène	Recours très important aux CAD Développement d'un avion à hydrogène en 2035	Recours important aux CAD Pas d'avion à hydrogène	Recours significatif aux CAD Développement d'un avion à hydrogène en 2040
Scénario 0	Scénario A	Scénario B	Scénario C									
Pas de CAD ni d'hydrogène	Recours très important aux CAD Développement d'un avion à hydrogène en 2035	Recours important aux CAD Pas d'avion à hydrogène	Recours significatif aux CAD Développement d'un avion à hydrogène en 2040									
Objectifs	<ul style="list-style-type: none"><li>• Développer une industrie française des CAD et d'hydrogène bas-carbone ;</li><li>• Développer une filière d'approvisionnement des aéroports français.</li></ul>											
Exemple de mesures/directives existantes	<ul style="list-style-type: none"><li>• Feuille de route française pour le déploiement des biocarburants aéronautiques durables ;</li><li>• ReFuelEU Aviation: feuille de route européenne sur l'introduction de CAD (en cours de discussions dans le cadre du paquet législatif « Fit for 55 »).</li></ul>											
Exemples de mesures supplémentaires qui pourraient être mises en œuvre	<ul style="list-style-type: none"><li>• <b>Réglementaires :</b><ul style="list-style-type: none"><li>○ Augmentation de la taxation du kérosène conventionnel, par exemple par la suppression des avantages fiscaux accordés au kérosène ;</li><li>○ Adoption de mandats obligatoires d'incorporation de CAD pour les compagnies aériennes.</li></ul></li><li>• <b>Institutionnelles :</b><ul style="list-style-type: none"><li>○ Pilotage du développement des filières de production et d'approvisionnement de CAD et d'hydrogène peu carboné ;</li><li>○ Pilotage du développement de la production d'électricité peu carbonée et des volumes de ressources techniquement mobilisables en biomasse.</li></ul></li><li>• <b>Economiques :</b></li></ul>											



Décarboner le mix énergétique embarqué par les avions		
		<ul style="list-style-type: none"> <li>Investissements privés et subventions publiques pour développer un réseau d'approvisionnement des aéroports en CAD et en hydrogène ;</li> <li>Investissements privés et subventions publiques pour développer les capacités industrielles françaises de production de CAD et d'hydrogène bas-carbone.</li> <li>Investissements publics et privés dans le développement de la production d'électricité bas-carbone et des volumes de ressources techniquement mobilisables en biomasse.</li> </ul>
Lien avec d'autres secteurs		<ul style="list-style-type: none"> <li>Tout comme le secteur des EnR a été encouragé par des leviers financiers afin de devenir compétitif avec d'autres méthodes de production d'électricité, il est envisageable d'imaginer des mécanismes similaires afin d'encourager le développement des filières de production et d'approvisionnement en CAD et en hydrogène.</li> </ul>
Acteurs concernés		<ul style="list-style-type: none"> <li>Etat ;</li> <li>Etablissements de recherche ;</li> <li>Filières carburants et électricité ;</li> <li>Compagnies aériennes ;</li> <li>Pouvoirs publics.</li> </ul>
Gains attendus	Impact GES	La baisse de l'intensité carbone du mix énergétique des flottes est un des deux leviers techniques majeurs de réduction des émissions du secteur aérien (Partie 5.1.3).
	Autres impacts environnementaux	<p>Les effets non-CO<sub>2</sub> à court et moyen terme pourraient potentiellement être limités via l'utilisation de CAD. La mesure de cet impact présente cependant encore de très grandes marges d'incertitudes et est difficilement quantifiable (Partie 5.2.1.3).</p> <p>La production de l'électricité bas-carbone et/ou des cultures énergétiques dédiées nécessaires à la production des CAD et de l'hydrogène conduira très probablement à artificialiser les sols, ce qui aura un impact négatif sur l'environnement.</p>
	Impacts socio-économique	<p>L'intégration de nouveaux carburants moins émetteurs nécessiterait :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>La structuration de nouvelles filières de production et d'approvisionnement en carburants en France ;</li> <li>Le développement des filières de production d'électricité bas-carbone et de mobilisation des ressources en biomasse.</li> </ul> <p>Cela induirait ainsi la création d'emplois locaux.</p>
	Autres impacts	Renforcement de la souveraineté de la France sur ses ressources énergétiques
Limites / obstacles identifiés		<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Impacts économiques :</b> Importance des investissements nécessaires au développement des filières de production et d'approvisionnement amont et aval.</li> <li><b>Acceptabilité :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Acceptabilité par le consommateur de l'augmentation des coûts répercutée sur le prix des billets (Le prix des biocarburants est estimé à 4 fois supérieur à celui du kérosène en 2020 mais le développement massif de cette industrie et les allègements fiscaux pourraient diminuer fortement ce prix)</li> <li>Concurrence avec d'autres secteurs (biocarburants utilisés pour d'autres mobilités, usages multiples de l'hydrogène) ;</li> <li>Tensions sur les ressources en biomasse et en électricité peu carbonées en France.</li> </ul> </li> <li><b>Faisabilité :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Ressources limitées en matières premières ;</li> <li>Production d'électricité carbonée dans les Outre-mer.</li> </ul> </li> </ul>

Décarboner le mix énergétique embarqué par les avions	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Autres impacts environnementaux :</b> L'impact sur les sols et sur la biodiversité de la production de biocarburants est limité car ceux-ci sont produits à partir de résidus agricoles/forestiers. En revanche, si le secteur décide de produire des biocarburants à partir de monocultures énergétiques dédiées (tel le miscanthus), une gestion durable des terres doit être réalisée afin de limiter leur impact : disparité des cultures, type de sol précédant la culture, rendements...</li> </ul>
Mesures permettant de lever les obstacles	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Expression d'une volonté forte de l'Etat sur ce sujet : subventions à la production et/ou à l'intégration de CAD et suppressions des avantages fiscaux sur le kérosène ;</li> <li>• Coordination au niveau international sur le sujet (a minima UE)</li> <li>• Réglementations permettant de cadrer la production de biocarburants, notamment sur les matières premières utilisées ;</li> <li>• Arbitrages publics entre les différents usages des matières premières utilisées (ressources en biomasse et électricité bas-carbone), éventuellement organisés dans le cadre d'une consultation / concertation publique.</li> </ul>

## 6.2.9. Mesures de décarbonation des aéroports

Décarboner les aéroports		
Contexte et enjeux :		<p>Les émissions directes (scope 1 et 2) des aéroports sont à l'origine de 5% des émissions du secteur aérien [104]. L'aéroport Paris Charles de Gaulle représentait 76 millions de passagers en 2019 (9ème aéroport mondial en termes de passagers et premier aéroport français [30]).</p> <p>Par ailleurs, une grande source d'émissions des aéroports (hormis le vol des avions) provient du mode de transport utilisé pour y accéder ou le quitter. En effet, aujourd'hui en France, la majorité (66 %) du transport vers et depuis les aéroports se fait en voiture, 5 % en train et 23 % en transport en commun, selon la DGAC.</p>
Détail application dans les scénarios		Cette mesure n'est pas mobilisée dans les scénarios élaborés.
Objectifs		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Limiter les impacts de la gestion des aéroports sur le climat</li> <li>• Limiter les impacts environnementaux des modes d'accès aux aéroports</li> </ul>
Exemple de mesures/directives existantes		<ul style="list-style-type: none"> <li>• ACA : Airport Carbon Accreditation est un programme développé par l'ACI (Conseil International des Aéroports) pour encourager les efforts des aéroports dans leur démarche de réduction de leur empreinte carbone.</li> <li>• L'Union des Aéroports Français et Francophones Associés (UAF &amp; FA) porte actuellement un programme intitulé EASEE qui est financé par les Certificats d'Economie d'Energie (CEE) et qui vise à augmenter le nombre d'aéroports certifiés ACA niveau 2 [236].</li> <li>• Des actions existent pour réduire leurs émissions absolues et leurs émissions unitaires (par passager ou par unité de trafic). La Loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte en 2015 fixe par ailleurs pour objectif, pour les 11 aéroports français les plus importants, une réduction de -20 % de leurs émissions de GES et de polluants atmosphériques en 2025 par rapport à 2010 [124].</li> </ul>
Exemples de mesures supplémentaires qui pourraient être mises en œuvre		<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Réglementaires :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Obligations d'amélioration de la performance de chauffage des bâtiments et le recours à la production de chaleur à partir de ressources peu carbonées ;</li> <li>○ Réglementer l'utilisation des APU sur les plateformes ;</li> <li>○ Décarbonation des engins de piste (voir notes de page Partie 6.2.7) ;</li> <li>○ Electrification des emplacements de stationnement des avions sur les aéroports (voir notes de page Partie 6.2.7).</li> </ul> </li> <li>• <b>Economiques :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Planifier et investir dans la multiplication des modes de transports et notamment la desserte en transports en commun accessibles au départ et à l'arrivée des aéroports, et adaptée aux horaires des vols.</li> <li>○ Limiter le stationnement automobile des aéroports (augmentation des tarifs, interdiction...);</li> <li>○ Equipements des parkings aéroportuaires en station de recharge des véhicules électriques.</li> </ul> </li> <li>• <b>Autres :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Limiter la climatisation dans les bâtiments ;</li> <li>○ Déployer des infrastructures de multimodalité pour encourager le report modal vers des modes de transport moins carbonés vers et depuis les aéroports, et ce en concertation avec les acteurs publics et les aéroports concernés.</li> </ul> </li> </ul>
Lien avec d'autres secteurs		NA
Acteurs concernés		Aéroports, Etat, Collectivités territoriales
Gains attendus	Impact GES	L'impact de ces mesures, bien que non évalué dans le cadre de cette étude, permettrait de diminuer les émissions des aéroports.
	Autres impacts environnementaux	La décarbonation des modes d'accès aux aéroports a pour impact une amélioration de la qualité de l'air grâce à la réduction de la pollution atmosphérique. De même, les nuisances sonores peuvent être limitées grâce à l'utilisation de modes de transport électriques (tramways, véhicules électriques...)

Décarboner les aéroports		
	Impacts socio-économique	La diversité des secteurs concernés par cette mesure rend la quantification des évolutions d'emplois complexe. Il est néanmoins certains que plusieurs filières (et leurs métiers associés) se verront valorisées : isolation des bâtiments, création des réseaux de transport en commun pour la desserte des aéroports, etc. impliquant des créations d'emplois dans ces secteurs.
	Autres impacts	NA
Limites / obstacles identifiés		<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Acceptabilité :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Augmentation des prix des parkings ;</li> <li>○ Temps de trajets parfois plus longs dans le cas de transports en commun.</li> </ul> </li> </ul>
Mesures permettant de lever les obstacles		

## 6.2.10. Mesures de compensation des émissions résiduelles

Compenser les émissions résiduelles		
Contexte et enjeux :		<p>Différentes mesures permettent de diminuer les émissions de GES du secteur du transport aérien (Partie 3). A l'issue de la mise en œuvre de ces mesures, certaines émissions résiduelles subsistent. Il peut alors être envisagé de les « compenser », afin de minimiser l'impact environnemental induit.</p> <p>Un encadrement clair et rigoureux de cette démarche est nécessaire afin d'éviter un certain nombre d'écueils possibles dans ces mécanismes :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• S'assurer ce processus permette effectivement de compenser les émissions sur le long terme en vérifiant la validité des projets correspondants ;</li> <li>• S'assurer que le processus de compensation ne se substitue pas à la réduction des émissions, qui est prioritaire.</li> </ul> <p>Pour cela un projet de compensation doit ainsi répondre à 5 principes :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Vérifiabilité</b> : une tierce personne accréditée vérifie la compensation ;</li> <li>• <b>Additionnalité</b> : les réductions/séquestrations vérifiées n'auraient pas eu lieu sans le projet de compensation ;</li> <li>• <b>Permanence</b> : les réductions/séquestrations sont maintenues dans le temps ;</li> <li>• <b>Prévention des pertes</b> : le projet n'entraîne pas d'autres émissions hors périmètre ;</li> <li>• <b>Non répétition</b> : les réductions/séquestrations ne sont prises en compte qu'une fois.</li> </ul>
Détail application dans les scénarios		Cette mesure n'est pas mise en œuvre dans les scénarios élaborés. En effet, l'étude se focalise ici sur la réduction des émissions du secteur aérien, réduction qui est prioritaire par rapport à la séquestration des émissions résiduelles (de la même manière que dans la SNBC).
Objectifs		Permettre au secteur de compenser ses émissions résiduelles, tout en priorisant la baisse de ses émissions, en s'assurant de l'impact positif sur le long terme sur le climat des projets de compensation, et de l'absence d'effets rebond.
Exemple de mesures/directives existantes		<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA)</b> : mécanisme de compensation des émissions implémenté par l'OACI.</li> <li>• <b>Loi Climat et Résilience</b> : Obligation de compensation des émissions des vols intérieurs métropolitains [119].</li> </ul>
Exemples de mesures supplémentaires qui pourraient être mises en œuvre		<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Réglementaires</b> : obligation de compensation des émissions résiduelles de l'ensemble des vols par les compagnies et les opérateurs ;</li> <li>• <b>De sensibilisation</b> : exemplarité des services de l'Etat avec compensation des émissions des déplacements réalisés en avion ;</li> <li>• <b>Institutionnelles</b> : établissement à l'échelle nationale des principes d'une telle compensation et développement du label bas-carbone.</li> <li>• <b>Autres</b> : développement de la compensation volontaire.</li> </ul>
Lien avec d'autres secteurs		Les opérations de compensation sont actuellement réalisées en majorité par des acteurs des secteurs agricoles et forestiers.
Acteurs concernés		Etat, tous les acteurs du secteur, secteur offrant des crédits de compensation.
Gains attendus	Impact GES	Le bilan des émissions d'un projet de compensation doit être négatif pour que celui-ci puisse générer des crédits d'absorption.
	Autres impacts environnementaux	Certains projets de compensations bien menés peuvent favoriser le développement de la biodiversité et favoriser la restauration de sols dégradés.



Compenser les émissions résiduelles		
	Impacts socio-économique	Cette mesure impliquera la multiplication d'organismes ou d'entités habilités à réaliser des audits et la vérification de ces mécanismes de compensation, impliquant la création d'emplois liés à ces services.
	Autres impacts	NA
Limites / obstacles identifiés		<p>Les limites de ces mesures sont liées aux 5 principes que doivent vérifier les projets de compensation (voir « Contexte et enjeux »).</p> <p>Il faut y ajouter les effets rebonds et démobilisateurs : la pratique de la compensation carbone pourrait avoir des effets contraires sur les émissions du secteur aérien : à la fois un effet vertueux (via un effet prix sur les billets : la compensation a un coût), et un effet pervers (via la démobilisation et déculpabilisation des clients : compenser les émissions de son vol résout les scrupules environnementaux, donc incite à prendre l'avion plus souvent).</p>
Mesures permettant de lever les obstacles		<p>Mise en place d'un audit exigeant vérifiant :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• La durabilité et l'efficacité des projets de compensation ;</li> <li>• L'utilisation non abusive du mécanisme en s'assurant que les acteurs s'impliquent prioritairement en parallèle pour éviter les émissions.</li> </ul>

## CONCLUSION

---

La présente étude a tout d'abord permis de dresser un état des lieux du secteur aérien, des connaissances sur ses impacts environnementaux et économiques, ainsi que de ses acteurs et de la manière dont il est réglementé (Partie 2).

Les travaux ont ensuite consisté à :

- Etudier de manière objective et scientifique les leviers de décarbonation du secteur aérien (Partie 3 et fiches leviers en Annexe 4) ;
- Elaborer un scénario de référence et trois scénarios contrastés de transition écologique du secteur aérien (Partie 4) sur la base des scénarios disponibles au démarrage de l'étude (Annexe 3) ;
- Evaluer les impacts de ces scénarios en termes d'émissions de CO<sub>2</sub> (Partie 5.1), d'autres impacts environnementaux (effets hors CO<sub>2</sub>, qualité et artificialisation des sols et des paysages, biodiversité, pollution de l'air, nuisances sonores, risques technologiques l'artificialisation de sols ou la sauvegarde la biodiversité - Partie 5.2) et d'impacts socio-économiques (Partie 5.3) ;
- Recenser les principales mesures de mise en œuvre de ces scénarios (Partie 6).

Ces travaux se sont appuyés sur les connaissances disponibles auprès des parties prenantes du secteur (DGAC, compagnies aériennes, constructeurs, associations environnementales ...). Les arbitrages et conclusions relèvent de la responsabilité de l'ADEME, commanditaire de l'étude.

Trois leviers majeurs de décarbonation du secteur aérien se dégagent. Ce sont les leviers de la modération du trafic, de l'amélioration de l'efficacité énergétique des flottes et de la baisse de l'intensité carbone du mix de carburants utilisé dans les avions. Ces trois leviers présentent chacun des avantages et des limites.

La réduction du trafic (en absolu ou en relatif par rapport au niveau du trafic de référence) est un levier de décarbonation du secteur aérien disponible à court terme. Son efficacité est très forte, même si des effets de fuite pourraient être observés. Il est considéré comme prioritaire et urgent par le Haut Conseil pour le Climat.

La mobilisation de ce levier aurait un impact sur le niveau d'activité des compagnies aériennes, des aéroports et de leurs partenaires du transport aérien. Des changements stratégiques pourraient s'avérer nécessaires. Le volume d'emplois liés aux activités aériennes s'en trouverait affecté. Mais parallèlement, cette évolution bénéficierait probablement à l'activité économique d'autres secteurs (tourisme local). Le recours à ce levier pourrait également avoir un impact à terme sur l'activité des constructeurs aéronautiques. Enfin, la baisse relative de l'offre pourrait affecter certains voyageurs.

Pour être acceptées, la modération et la réduction du niveau de trafic nécessitent donc des politiques publiques d'accompagnement d'une partie du secteur aérien, ainsi que des autres acteurs indirectement concernés. Elles nécessiteront également un changement des pratiques vers un tourisme local et bas-carbone. Ce changement pourrait permettre de compenser les pertes d'activités et de revenus liés à la diminution du tourisme international longue-distance à destination de la France.

Des études supplémentaires sont nécessaires pour préciser par quelles mesures concrètes ce levier serait activé, lever les éventuels freins juridiques et prévenir les risques de recours. Des expérimentations permettraient de vérifier l'ensemble des points importants, avant une généralisation éventuelle.

L'amélioration de l'efficacité énergétique des flottes aériennes est un levier de moyen et long terme. En effet, il repose sur le développement de nouvelles générations d'avion plus efficaces, qui devraient apparaître au plus tôt vers 2035, ainsi que sur le renouvellement des flottes, alors que les appareils ont une durée de vie moyenne de 20 à 25 ans.

La baisse de l'intensité carbone du mix énergétique consiste à remplacer le kérosène par des sources d'énergies décarbonées, ou ayant une empreinte carbone moindre. Les sources d'énergies existantes ou envisagées aujourd'hui sont les biocarburants d'aviations durables (notamment ceux produits à partir de résidus de culture et d'agroforesterie), les électrocarburants (produits à partir de CO<sub>2</sub> capté à la sortie de sites industriels et d'électricité bas-carbone) et l'hydrogène bas-carbone (produit à partir d'électricité bas-carbone). Ces carburants alternatifs ne sont pas produits en masse aujourd'hui. La mobilisation de ce levier nécessite d'importants investissements publics et privés dès aujourd'hui dans le développement de nouvelles technologies et installations de production industrielle, ainsi que dans des installations de production d'électricité bas-carbone.

La mobilisation des leviers de l'amélioration de l'efficacité énergétique et de la baisse de l'intensité carbone du mix énergétique a un impact sur les coûts d'opération des compagnies aériennes et donc sur le prix des billets. En effet, le renouvellement des flottes aériennes avec des appareils plus efficaces donc chers représente une dépense très importante pour les compagnies aériennes. De plus, les carburants d'aviation durables (les CAD, c'est-à-dire les biocarburants d'aviation durable et les électrocarburants) coûtent aujourd'hui en moyenne quatre fois plus chers que l'hydrogène, et leurs coûts (ainsi que celui de l'hydrogène bas-carbone) devraient rester bien au-dessus de celui actuel du kérosène jusqu'en 2050. Le recours à ces deux leviers provoquera probablement une hausse des prix des billets et donc une baisse de la demande.

Les Etats peuvent néanmoins réduire l'impact sur le trafic des effets prix liés à la modernisation des flottes aériennes et de l'intégration de CAD et d'hydrogène bas-carbone en subventionnant le secteur aérien. Cependant, les montants des subventions à accorder au secteur pour atténuer les effets prix sont très élevés (potentiellement plusieurs dizaines de milliards d'euros en cumulé sur la période 2019-2050, et entre 2 à 4 milliards d'euros par an en 2050). Et de telles subventions, ayant pour effet une augmentation relative du trafic, contribuerait donc à une hausse relative des émissions.

Il est donc essentiel que la France quantifie systématiquement les enjeux en termes de gain ou d'augmentation des émissions de gaz à effet de serre de ses politiques publiques relatives au secteur aérien, et ce dès le stade de leur élaboration « pour arbitrer les directions et mesures structurelles proposées, avec une prise en compte adaptée des enjeux GES associés » comme le recommande le Haut Conseil pour le Climat.

Ces trois leviers majeurs sont mobilisés dans les trois scénarios de transition, aux côtés d'autres leviers relativement moins efficaces de décarbonation du secteur aérien comme l'amélioration des taux de remplissage ou l'amélioration des opérations au vol et au sol.

Les trois scénarios de transition construits dans le cadre de cette étude sont des scénarios contrastés, puisqu'ils mobilisent de manière différente les leviers de décarbonation du secteur.

- Dans le scénario 0, intitulé « Scénario de référence », le trafic aérien se développe selon les tendances actuelles, sans modération du trafic ou commercialisation de nouveaux modèles d'avions par rapport à ceux disponibles aujourd'hui ;
- Dans le scénario A, intitulé « Rupture technologique », des investissements importants sont réalisés dans l'aéronautique et la production de CAD, afin de conserver un niveau de trafic élevé et de permettre au secteur de poursuivre sa croissance économique ;
- Dans le scénario B, intitulé « Modération du trafic », des mesures de réduction et de modération du trafic et les CAD sont mobilisés pour minimiser les émissions cumulées entre 2020 et 2050 et réduire nettement les émissions d'ici 2030 ;
- Dans le scénario C, intitulé « Tous leviers », la décarbonation du secteur s'appuie sur tous les leviers disponibles afin de réduire le recours à des technologies de rupture

L'étude des impacts de ces trois scénarios permet de retirer plusieurs enseignements. Tout d'abord, il apparaît que la production d'électrocarburants n'est pas un levier pertinent de décarbonation pour les vols au départ de l'Amérique du Nord, de l'Asie, de l'Afrique et de l'Océanie, puisque ces pays ne disposeront pas d'ici 2050 de mix électrique suffisamment décarboné. Les vols à destination de la France resteront donc plus carbonés que ceux en partance de ce pays. L'impact climatique réel des voyages diminuera donc moins vite que celui des vols au départ de la France. Pour suivre cette décarbonation, les émissions liées aux vols au départ et à l'arrivée de la France devront être suivies au niveau national au même titre que celles liées seulement aux vols au départ de la France.

Par ailleurs, du kérosène sera encore consommé en 2050 dans les avions qui ne seront pas certifiés pour embarquer 100 % de CAD. Il est donc essentiel que des efforts importants soient déployés dès aujourd'hui pour permettre la certification rapide des modèles d'avions disponibles actuellement sur le marché, et que les flottes aériennes se renouvellent suffisamment rapidement pour ne pas limiter leur capacité à embarquer des CAD.

Dans tous les scénarios de transition, les consommations d'hydrogène restent marginales en 2050. En effet, l'hydrogène n'est pertinent que pour des vols court-courriers (de moins de 2000 km), du fait de contraintes techniques. Par ailleurs, les premiers avions court-courriers à hydrogène n'apparaissent au mieux qu'en 2035. C'est également le cas pour l'électricité, qui ne permet d'alimenter que des vols de moins de 1000 km dans les scénarios de transition, et ce également pour des raisons techniques (poids des batteries notamment).

L'amélioration de l'efficacité énergétique des flottes aériennes permet, dans tous les scénarios de transition, de diminuer les consommations totales d'énergies entre 2019 et 2050, et ce malgré la hausse du trafic durant cette période dans deux des scénarios. Cependant, la baisse de l'intensité carbone du

mix énergétique conduit à une forte hausse des consommations d'énergie primaire du secteur aérien entre 2019 et 2050.

Une telle évolution implique également d'approvisionner massivement le secteur aérien en CAD et en hydrogène bas-carbone. Ces besoins peuvent conduire à des conflits d'utilisation des ressources rares que sont certains résidus de culture et l'électricité bas-carbone, qui sont également nécessaires à la décarbonation d'autres secteurs de l'économie : des arbitrages publics devront intervenir, ainsi qu'une augmentation de l'ambition des objectifs nationaux actuels de production d'électricité bas-carbone. La mobilisation du levier de la réduction ou de la modération du trafic permet également de réduire ses potentiels conflits d'usages, en diminuant la quantité de CAD et d'hydrogène bas-carbone à embarquer dans les vols au départ et à l'arrivée de la France.

La trajectoire de décarbonation du secteur aérien basée sur la réduction du trafic aérien à court terme et une croissance modérée du trafic à moyen et long terme est la trajectoire qui minimise le plus les effets hors CO<sub>2</sub>, la pollution de l'air et les nuisances sonores entre 2020 et 2050.

Le levier de la réduction absolue ou relative du trafic est le levier associé aux plus grands bénéfices environnementaux dans le cadre de la transition bas-carbone du secteur aérien.

La France a donc le choix entre plusieurs trajectoires de transition (c'est-à-dire de combinaisons de leviers) différentes pour diminuer l'impact climatique du secteur aérien. Le choix repose sur un arbitrage entre des objectifs et des contraintes parfois opposés :

- Objectifs climatiques sectoriels (niveau et rythme de diminution des émissions de CO<sub>2</sub>) ;
- Objectifs environnementaux (atteinte de l'objectif zéro-artificialisation nette, préservation de la biodiversité...) ;
- Contraintes d'acceptabilité (maintien des prix des billets à un prix abordable, augmentation du trafic aérien, diminution des populations exposées aux pollutions sonores et de l'air...) ;
- Objectifs socio-économiques (développement de l'activité du secteur aérien, développement du tourisme bas-carbone, maintien de la compétitivité de l'industrie aéronautique ...) ;
- Contraintes de faisabilité technique (augmentation de la production d'électricité renouvelable par rapport aux prévisions de la SNBC, détournement d'une partie des usages biomasses prévus dans la SNBC à destination du secteur aérien...).

Cet arbitrage nécessite au préalable un approfondissement de la connaissance du levier de la maîtrise du niveau de trafic.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- [1] ATAG, « Aviation benefits beyond borders », 2020. [En ligne]. Disponible sur: [https://aviationbenefits.org/media/167186/abbb2020\\_full.pdf](https://aviationbenefits.org/media/167186/abbb2020_full.pdf)
- [2] IATA, « Cargo Operations - IATO Cargo webinars ». octobre 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.iata.org/contentassets/23608a1cdaa543ef877cc617ce99d21e/cargo-ops-master-slides.pdf>
- [3] GIFAS, « Rapport annuel 2018-2019 », 2019. [En ligne]. Disponible sur: [https://res.cloudinary.com/gifas/image/upload/rapport/rapport-annuel\\_2018\\_2019.pdf](https://res.cloudinary.com/gifas/image/upload/rapport/rapport-annuel_2018_2019.pdf)
- [4] par F. Mazoir, « Emploi : les chiffres-clés du secteur aéronautique », *HelloWorkplace*, 19 juin 2015. <https://www.helloworkplace.fr/emploi-aeronautique/> (consulté le 6 avril 2021).
- [5] IATA, « The importance of Air Transport in France ». 2018.
- [6] DGAC, « Les émissions gazeuses liées au trafic aérien en France en 2019 », 2020. [En ligne]. Disponible sur: [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)
- [7] « Rapport Secten 2021 », *Citepa*, 2021. <https://www.citepa.org/fr/secten/> (consulté le 5 janvier 2022).
- [8] A. Nationale, « LOI n° 2019-1147 du 8 novembre 2019 relative à l'énergie et au climat (1) - Légifrance », 8 novembre 2019. <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000039355955/> (consulté le 28 mars 2022).
- [9] MTE, « Stratégie Nationale Bas Carbone », 2020.
- [10] MTE, « Stratégie Nationale du Transport Aérien », 2020.
- [11] OACI, « Changement climatique : Programme d'action », octobre 2009. <https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/FR/programme-action.aspx> (consulté le 2 mars 2022).
- [12] ATAG, « Waypoint 2050 - 2nd edition », 2021. [En ligne]. Disponible sur: [https://aviationbenefits.org/media/167187/w2050\\_full.pdf](https://aviationbenefits.org/media/167187/w2050_full.pdf)
- [13] IATA, « Élimination des émissions nettes de carbone d'ici 2050 », p. 4, oct. 2021.
- [14] Notre Affaire à Tous, « Propositions juridiques pour une réduction drastique des émissions de l'aérien », 2021.
- [15] The Shift Project et Supaero Decarbo, « Pouvoir voler en 2050 : Quelle aviation dans un monde contraint », mars 2021. Consulté le: 3 avril 2021. [En ligne]. Disponible sur: [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)
- [16] 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%20l%27a%20C3%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%20l%27a%20C3%A9ronautique.pdf)
- [17] Convention Citoyenne pour le Climat, « Rapport final », 2021.
- [18] A. Nationale, « Projet de loi n° 3875 portant lutte contre le dérèglement climatique et renforcement de la résilience face à ses effets », *Assemblée nationale*. [https://www.assemblee-nationale.fr/dyn/15/textes/l15b3875\\_projet-loi](https://www.assemblee-nationale.fr/dyn/15/textes/l15b3875_projet-loi) (consulté le 23 mars 2021).
- [19] HCC, *Rapport annuel 2022*. 2022.
- [20] Cite, « Objectif de neutralité carbone de l'aviation : déclaration de Toulouse », *Citepa*, 14 février 2022. [https://www.citepa.org/fr/2022\\_02\\_b02/](https://www.citepa.org/fr/2022_02_b02/) (consulté le 28 mars 2022).
- [21] OACI, « Environmental Report 2019: "Destination green : the next chapter" », p. 376, 2019.
- [22] OACI, « Feasibility of a long term global aspirational goal (LTAG) for international aviation », 9 juin 2022. <https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/LTAG.aspx> (consulté le 9 juin 2022).
- [23] Ministère chargé des transports, « Déclaration de Toulouse sur le développement durable et la décarbonation de l'aviation », 2020.



- [24] Autorité de Contrôle des Nuisances Aéroportuaires, « Qu'est ce qu'un APU ? », *Acnusa*. <https://www.acnusa.fr/fr/le-saviez-vous/les-avions/quest-ce-quun-apu-auxiliary-power-unit/116> (consulté le 5 avril 2021).
- [25] OACI, « Transport aérien, voyageurs transportés », *Banque Mondiale*. <https://donnees.banquemondiale.org/indicateur/IS.AIR.PSGR> (consulté le 1 avril 2021).
- [26] D. S. Lee et al., « The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018 », *Atmos Environ* (1994), vol. 244, p. 117834, 2020, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.117834.
- [27] OACI, « Transport aérien, fret », *Banque Mondiale*. <https://donnees.banquemondiale.org/indicateur/IS.AIR.GOOD.MT.K1> (consulté le 2 avril 2021).
- [28] P. Zembri, « Chapitre 9. Transports et mobilités : quelles limites ? », in *Géographie humaine. Mondialisation, inégalités sociales et enjeux environnementaux*, 2020. Consulté le: 22 mars 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03104015>
- [29] IATA, « Safety Report 2019 », 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.skybrary.aero/bookshelf/books/5640.pdf>
- [30] DGAC, « Bulletin statistique 2019 - Aviation commerciale », 2020. [En ligne]. Disponible sur: [https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/bulletin\\_stat\\_trafic\\_aerien\\_2019.pdf](https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/bulletin_stat_trafic_aerien_2019.pdf)
- [31] P. Chiambaretto, « Trafic aérien mondial, une croissance fulgurante pas prête de s'arrêter », *The Conversation*. <http://theconversation.com/trafic-aerien-mondial-une-croissance-fulgurante-pas-prete-de-sarreter-116107> (consulté le 1 avril 2021).
- [32] C. Fayolle, « La dérégulation du transport aérien en Europe », *Guerres mondiales et conflits contemporains*, vol. n° 209, n° 1, p. 75-89, 2003.
- [33] Parlement européen, « Transports aériens : règles du marché ». <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/fr/sheet/131/transports-aeriens-regles-du-marche> (consulté le 22 mars 2021).
- [34] IATA, « The importance of air transport to France », 2019. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/france-value-of-aviation/>
- [35] IEA, « World Energy Outlook 2019 – Analysis », *IEA*. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019> (consulté le 9 avril 2022).
- [36] ICCT, « Rapport Annuel ». 2019. [En ligne]. Disponible sur: <https://theicct.org/sites/default/files/ICCT-AnnualReport-2019.pdf>
- [37] « Statistiques sur le transport de marchandises - Statistics Explained ». [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Freight\\_transport\\_statistics/fr&oldid=373293](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Freight_transport_statistics/fr&oldid=373293) (consulté le 23 mars 2021).
- [38] « Chiffres clés du transport - Édition 2020 », *Données et études statistiques pour le changement climatique, l'énergie, l'environnement, le logement et les transports*. <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/chiffres-cles-du-transport-edition-2020> (consulté le 23 mars 2021).
- [39] Statista, « Classement des aéroports de fret dans le monde 2019 », *Statista*. <https://fr.statista.com/statistiques/570741/plus-grands-aeroports-de-fret-dans-le-monde-en-volume/> (consulté le 23 mars 2021).
- [40] Statista, « Trafic de fret des principaux aéroports en France 2019 », *Statista*. <https://fr.statista.com/statistiques/629466/volume-trafic-fret-principaux-aeroports-france/> (consulté le 23 mars 2021).
- [41] W. TLF, « Chiffres clés du Transport et de la Logistique », *Union TLF*. <https://www.e-tlf.com/dossiers-tlf/chiffres-cles/> (consulté le 23 mars 2021).
- [42] B. Chevalier, « Paris : les premiers taxis volants en test dès cet été ! », *Adentis*, 2 février 2021. <https://www.adentis.fr/paris-les-premiers-taxis-volants-en-test-des-cet-ete/> (consulté le 30 mars 2021).
- [43] BIS Research, « Global Drone Delivery Service Market: Focus on Drone Type, Package Size, Range, and Application - Analysis and Forecast, 2023-2030 », juin 2020. <https://www.researchandmarkets.com/reports/5094120/global-drone-delivery-service-market-focus-on> (consulté le 30 mars 2021).
- [44] Le Monde, « SpaceX prévoit l'envoi de ses premiers touristes dans l'espace pour la fin de 2021 », *Le Monde.fr*, 2 février 2021. Consulté le: 30 mars 2021. [En ligne]. Disponible sur:

- [https://www.lemonde.fr/sciences/article/2021/02/02/spacex-prevoit-l-envoi-de-ses-premiers-touristes-dans-l-espace-pour-fin-2021\\_6068431\\_1650684.html](https://www.lemonde.fr/sciences/article/2021/02/02/spacex-prevoit-l-envoi-de-ses-premiers-touristes-dans-l-espace-pour-fin-2021_6068431_1650684.html)
- [45] Le Parisien, « SpaceX va envoyer trois touristes vers la station spatiale internationale dès 2021 », *leparisien.fr*, 6 mars 2020. <https://www.leparisien.fr/societe/spacex-va-envoyer-trois-touristes-vers-l-iss-des-2021-06-03-2020-8273823.php> (consulté le 30 mars 2021).
- [46] S. Gössling et Humpe, « The global scale, distribution and growth of aviation: Implications for climate change », *Global Environmental Change*, p. 12, 2020.
- [47] IATA Pressroom, « Traveler Numbers Reach New Heights », 6 septembre 2018. <https://www.iata.org/en/pressroom/pr/2018-09-06-01/> (consulté le 25 mars 2022).
- [48] CNBC, « Boeing CEO: Over 80% of the world has never taken a flight. We're leveraging that for growth », *CNBC*, 7 décembre 2017. <https://www.cnbc.com/2017/12/07/boeing-ceo-80-percent-of-people-never-flown-for-us-that-means-growth.html> (consulté le 25 mars 2022).
- [49] « 36% des Français prennent l'avion tous les ans », *Natura Sciences*, 31 mars 2021. <https://www.natura-sciences.com/comprendre/francais-part-avion-tous-les-ans.html> (consulté le 2 août 2022).
- [50] Possible, « Elite Status: Global inequalities in flying », p. 54, mars 2021.
- [51] M. Pappalardo et al., « La mobilité des Français Panorama issu de l'enquête nationale transports et déplacements 2008 », p. 228, 2010.
- [52] T&E, « Private jets: can the super rich supercharge zero-emission aviation », p. 44, mai 2021.
- [53] DGAC, « Enquête Nationale auprès des Passagers Aériens 2015-2016 », 2017. [En ligne]. Disponible sur: [https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/ENPA\\_2015\\_2016.pdf](https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/ENPA_2015_2016.pdf)
- [54] C. PIERRE BERNASCONI, « Quel avenir pour les compagnies aériennes effectuant des vols moyens et courts courriers passagers en Europe pour », p. 111, juill. 2020.
- [55] Y. Demoli et J. Subtil, « Boarding Classes. Mesurer la démocratisation du transport aérien en France (1974-2008) », *Sociologie*, vol. 10, n° 2, p. 131-151, juill. 2019.
- [56] IATA, « Air cargo and e-commerce enabling global trade », mars 2019.
- [57] « Air Freight: A Market Study with Implications for Landlocked Countries », *World Bank*. <https://www.worldbank.org/en/topic/transport/publication/air-freight-study> (consulté le 14 juin 2022).
- [58] Sénat, « Rapport d'information fait nom de la mission commune d'information sur la situation des départements d'outre-mer », 2009. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.senat.fr/rap/r08-519-1/r08-519-11.pdf>
- [59] « Rapport d'information - Contribution du transport aérien au désenclavement et à la cohésion des territoires ». Consulté le: 22 mars 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.senat.fr/rap/r18-734/r18-7341.pdf>
- [60] IATA, « 2020 Worst Year in History for Air Travel Demand ». <https://www.iata.org/en/pressroom/pr/2021-02-03-02/> (consulté le 6 avril 2021).
- [61] « Effects of Novel Coronavirus (COVID-19) on Civil Aviation: Economic Impact Analysis - 24 décembre 2020 - OACI ». Consulté le: 22 mars 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.icao.int/sustainability/Documents/COVID-19/ICAO%20COVID%202020%2012%2024%20Economic%20Impact.pdf>
- [62] IATA, « 2020 Worst Year for Air Cargo Demand Since Performance Monitoring Began », 2021. <https://www.iata.org/en/pressroom/pr/2021-02-03-01/> (consulté le 7 avril 2021).
- [63] BFM TV, « 2020, l'année catastrophique du secteur aérien en chiffres ». [https://www.bfmtv.com/economie/2020-l-annee-catastrophique-du-secteur-aerien-en-chiffres\\_AN-202102180241.html](https://www.bfmtv.com/economie/2020-l-annee-catastrophique-du-secteur-aerien-en-chiffres_AN-202102180241.html) (consulté le 22 mars 2021).
- [64] Air Journal, « Air France-KLM : perte nette de 7,1 milliards d'euros et menace sur l'emploi ». <https://www.air-journal.fr/2021-02-18-air-france-klm-perte-nette-de-71-milliards-deuros-et-menace-sur-lemploi-5226078.html> (consulté le 23 mars 2021).
- [65] Les Echos, « Airbus résiste mieux que prévu au Covid », *Les Echos*, 18 février 2021. <https://www.lesechos.fr/industrie-services/air-defense/airbus-senfonce-dans-le-rouge-sous-leffet-du-covid-1291424> (consulté le 23 mars 2021).
- [66] « Avec 863 appareils livrés en 2019, Airbus est officiellement le premier constructeur mondial | Air Journal ». <https://www.air-journal.fr/2020-01-11-airbus-premier-avionneur-mondial-avec-863-appareils-en-2019-5217507.html> (consulté le 2 juin 2021).

- [67] Accenture, « Commercial Aerospace Insight Report », 2020. [En ligne]. Disponible sur: [https://www.accenture.com/\\_acnmedia/PDF-137/Accenture-Commercial-Aerospace-Insight-Report-2020.pdf](https://www.accenture.com/_acnmedia/PDF-137/Accenture-Commercial-Aerospace-Insight-Report-2020.pdf)
- [68] IATA, « Remarks of A. de Juniac at Media Briefing 3 February 2021 », 2021. <https://www.iata.org/en/pressroom/speeches/2021-02-03-01/> (consulté le 23 mars 2021).
- [69] Le Monde, « En six mois, le secteur de l'aéronautique a perdu la totalité des postes créés entre 2009 et 2019 », *Le Monde.fr*, 5 octobre 2020. Consulté le: 7 avril 2021. [En ligne]. Disponible sur: [https://www.lemonde.fr/economie/article/2020/10/05/en-six-mois-le-secteur-de-l-aeronautique-a-perdu-la-totalite-des-postes-crees-entre-2009-et-2019\\_6054747\\_3234.html](https://www.lemonde.fr/economie/article/2020/10/05/en-six-mois-le-secteur-de-l-aeronautique-a-perdu-la-totalite-des-postes-crees-entre-2009-et-2019_6054747_3234.html)
- [70] Les Echos, « Deux cents aéroports européens au bord de la faillite », *Les Echos*, 17 novembre 2020. <https://www.lesechos.fr/industrie-services/tourisme-transport/deux-cents-aeroports-europeens-au-bord-de-la-faillite-1265698> (consulté le 7 avril 2021).
- [71] IATA, « Air Passenger Numbers to Recover in 2024 - Communiqué de presse n°10 », 1 mars 2022. <https://www.iata.org/en/pressroom/2022-releases/2022-03-01-01/> (consulté le 4 avril 2022).
- [72] Ministère de la Transition écologique, « Statistiques du trafic aérien », *Ministère de la Transition écologique*, 22 mars 2022. <https://www.ecologie.gouv.fr/statistiques-du-traffic-aerien> (consulté le 4 avril 2022).
- [73] Le Monde, « « Pour Airbus, l'avenir s'annonce radieux, comme un ciel clair après l'orage » », *Le Monde.fr*, 5 mai 2022. Consulté le: 23 mai 2022. [En ligne]. Disponible sur: [https://www.lemonde.fr/economie/article/2022/05/05/pour-airbus-l-avenir-s-annonce-radieux-comme-un-ciel-clair-apres-l-orage\\_6124842\\_3234.html](https://www.lemonde.fr/economie/article/2022/05/05/pour-airbus-l-avenir-s-annonce-radieux-comme-un-ciel-clair-apres-l-orage_6124842_3234.html)
- [74] Mc Kinsey, « The Next Normal: Business Trends for 2021 ». <https://www.mckinsey.com/featured-insights/leadership/the-next-normal-arrives-trends-that-will-define-2021-and-beyond> (consulté le 23 mars 2021).
- [75] Christopher Jackson, « Surge in demand for air freight raises aviation's outlook, but for how long? » <https://www.reedsmith.com/fr/perspectives/global-air-freight/2022/01/surge-in-demand-for-air-freight-raises-aviations-outlook-but-for-how-long> (consulté le 15 juin 2022).
- [76] IATA, « The Cargo Facility of the Future », mars 2019.
- [77] McKinsey, « COVID-19's impact on the global aviation sector | McKinsey ». <https://www.mckinsey.com/industries/travel-logistics-and-infrastructure/our-insights/taking-stock-of-the-pandemics-impact-on-global-aviation> (consulté le 15 juin 2022).
- [78] Julien Lausson, « Amazon achète désormais ses propres avions pour faire ses livraisons », *Numerama*, 6 janvier 2021. <https://www.numerama.com/tech/680170-amazon-achete-desormais-ses-propres-avions-pour-faire-ses-livraisons.html> (consulté le 15 juin 2022).
- [79] Le Monde, « Covid-19 : les compagnies aériennes essuient 100 milliards d'euros de pertes en 2020 », *Le Monde.fr*, 25 novembre 2020. Consulté le: 23 mars 2021. [En ligne]. Disponible sur: [https://www.lemonde.fr/economie/article/2020/11/25/covid-19-les-compagnies-aeriennes-essuient-100-milliards-d-euros-de-pertes-en-2020\\_6061058\\_3234.html](https://www.lemonde.fr/economie/article/2020/11/25/covid-19-les-compagnies-aeriennes-essuient-100-milliards-d-euros-de-pertes-en-2020_6061058_3234.html)
- [80] « Présentation du plan de soutien à l'aéronautique ». <https://www.economie.gouv.fr/plan-soutien-aeronautique> (consulté le 23 mars 2021).
- [81] Air France KLM, « Répartition du capital », *Air France KLM*, 23 mai 2022. <https://www.airfranceklm.com/fr/finance/informations-financieres/repartition-du-capital> (consulté le 23 mai 2022).
- [82] « Air France: la recapitalisation est sur les rails », *LEFIGARO*. <https://www.lefigaro.fr/economie/air-france-la-recapitalisation-est-sur-les-rails-20210405> (consulté le 2 juin 2021).
- [83] The conversation, « Sauvetage d'Air France: les contreparties vont-elles compromettre le redécollage de la compagnie ? », *The Conversation*, 12 avril 2021. <http://theconversation.com/sauvetage-dair-france-les-contreparties-vont-elles-compromettre-le-redecollage-de-la-compagnie-158797> (consulté le 23 mai 2022).
- [84] ADEME, « Documentation Base Carbone - Kérozène ». [https://www.bilans-ges.ademe.fr/documentation/UPLOAD\\_DOC\\_FR/index.htm?new\\_liquides.htm](https://www.bilans-ges.ademe.fr/documentation/UPLOAD_DOC_FR/index.htm?new_liquides.htm) (consulté le 3 avril 2021).

- [85] S. Pinheiro Melo *et al.*, « Sustainability Assessment and Engineering of Emerging Aircraft Technologies—Challenges, Methods and Tools », *Sustainability*, vol. 12, n° 14, Art. n° 14, janv. 2020, doi: 10.3390/su12145663.
- [86] Chaire Pégase, « Les Français et l'impact environnemental du transport aérien : entre mythes et réalités », 2020. [En ligne]. Disponible sur: [https://251b84c7-b4ea-4c1d-81d7-6c1460292d00.filesusr.com/ugd/3e4751\\_1f5ba692c27444de901925f1ea243176.pdf](https://251b84c7-b4ea-4c1d-81d7-6c1460292d00.filesusr.com/ugd/3e4751_1f5ba692c27444de901925f1ea243176.pdf)
- [87] OACI, « Le monde du transport aérien en 2019 », 2019. [https://www.icao.int/annual-report-2019/Pages/the-world-of-air-transport-in-2019\\_fr.aspx](https://www.icao.int/annual-report-2019/Pages/the-world-of-air-transport-in-2019_fr.aspx) (consulté le 5 avril 2021).
- [88] Eurocontrol, « Data snapshot CO2 emissions 2020 », 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2021-01/eurocontrol-data-snapshot-co2-emissions-2020.pdf>
- [89] EASA et EEA, *Updated analysis of the non-CO2 climate impacts of aviation and potential policy measures pursuant to the EU Emissions Trading System Directive Article 30*. LU: Publications Office, 2020. Consulté le: 5 avril 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://data.europa.eu/doi/10.2822/309946>
- [90] CITEPA, « Rapport Secten », *Citepa*, 2020. <https://www.citepa.org/fr/secten/> (consulté le 5 avril 2021).
- [91] MTE, « L'empreinte carbone des Français reste stable », p. 4, janv. 2020.
- [92] Eco CO2, « Empreinte carbone moyenne française : 9,9 tonnes de CO2eq, selon Carbone 4 », *Eco CO2*, 14 janvier 2022. <https://www.ecoco2.com/blog/empreinte-carbone-moyenne-francaise-99-tonnes-de-co2eq-selon-carbone-4/> (consulté le 6 avril 2022).
- [93] DGAC, « Calculateur d'émissions de gaz à effet de serre de l'aviation | ecocalc », 1 juin 2022. <https://eco-calculateur.dta.aviation-civile.gouv.fr/> (consulté le 1 juin 2022).
- [94] ADEME, « Documentation Base Carbone - Aérien ». [https://www.bilans-ges.ademe.fr/documentation/UPLOAD\\_DOC\\_FR/index.htm?aerien.htm](https://www.bilans-ges.ademe.fr/documentation/UPLOAD_DOC_FR/index.htm?aerien.htm) (consulté le 5 avril 2021).
- [95] Datagir, ADEME, « L'impact carbone de notre mobilité », 30 mars 2020. <https://datagir.ademe.fr/blog/impact-carbone-mobilite-eco-deplacement/> (consulté le 6 avril 2022).
- [96] IPCC, « IPCC WGI\_AR5\_glossary\_FR.pdf ». 2013.
- [97] G. Myhre *et al.*, « Anthropogenic and Natural Radiative Forcing », in *Climate Change 2013 - The Physical Science Basis*, Cambridge University Press, 2013, p. 659-740. doi: 10.1017/CBO9781107415324.018.
- [98] Isae-supaéro, « Aviation et climat », sept. 2021.
- [99] 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.
- [100] VIE Benoit (2022), « Que se passe-t-il dans les nuages ? », *Encyclopédie de l'environnement*, 29 janvier 2021. <https://www.encyclopedie-environnement.org/air/physique-nuages/> (consulté le 30 mars 2022).
- [101] ADEME, « État de l'art de la recherche scientifique sur l'impact climatique des traînées de condensation des avions - La librairie ADEME », avril 2021. <https://librairie.ademe.fr/mobilite-et-transport/4617-etat-de-l-art-de-la-recherche-scientifique-sur-l-impact-climatique-des-trainees-de-condensation-des-avions.html> (consulté le 31 mars 2022).
- [102] B. Kärcher, « Formation and radiative forcing of contrail cirrus », *Nat Commun*, vol. 9, n° 1, Art. n° 1, mai 2018, doi: 10.1038/s41467-018-04068-0.
- [103] I. Sanz-Morère, S. D. Eastham, F. Allroggen, R. L. Speth, et S. R. H. Barrett, « Impacts of multi-layer overlap on contrail radiative forcing », *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 21, n° 3, p. 1649-1681, févr. 2021, doi: 10.5194/acp-21-1649-2021.
- [104] Chaire Pégase, « Les Français et l'impact environnemental du transport aérien : entre mythes et réalités », 2020.
- [105] A. Bigo, « Les transports face au défi de la transition énergétique », p. 340.
- [106] Haut Conseil pour le Climat, « Renforcer l'atténuation, engager l'adaptation - La version grand public », septembre 2021.
- [107] « ADEME - Site Bilans GES ». <https://bilans-ges.ademe.fr/> (consulté le 9 avril 2022).
- [108] SNCF Connect, « Calcul des émissions de CO2 sur votre trajet en train », 5 avril 2022. <https://www.sncf-connect.com/aide/calcul-des-emissions-de-co2-sur-votre-trajet-en-train> (consulté le 5 avril 2022).



- [109] Bon Pote, « Train vs Avion : Match retour ! », *Bon Pote*, 11 février 2021. <https://bonpote.com/train-vs-avion-match-retour/> (consulté le 5 avril 2021).
- [110] ADEME, « Bas Carbone - Transport de personnes », 1 juin 2022. <https://bilans-ges.ademe.fr/fr/accueil/documentation-gene/index/page/Ferroviaire2> (consulté le 1 juin 2022).
- [111] Commissariat général au développement durable, « La mobilité longue distance des Français en 2016 ». février 2018. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2018-11/datalab-essentiel-138-mobilite-longue-distance-2016-fevrier2018.pdf>
- [112] A. Bigo, « Impact du transport aérien sur le climat: pourquoi il faut refaire les calculs », *The Conversation*, 8 mai 2019. <http://theconversation.com/impact-du-transport-aerien-sur-le-climat-pourquoi-il-faut-refaire-les-calculs-116534> (consulté le 5 avril 2022).
- [113] J. Goguel, « Nous ne prendrons plus l'avion ! », *Libération*, 2019. [https://www.liberation.fr/debats/2019/02/11/nous-ne-prendrons-plus-l-avion\\_1708727/](https://www.liberation.fr/debats/2019/02/11/nous-ne-prendrons-plus-l-avion_1708727/) (consulté le 8 avril 2021).
- [114] « Seriez-vous prêt à renoncer à l'avion par souci écologique? », *RTBF Tendence*, 16 février 2020. [https://www.rtbef.be/tendance/green/detail\\_seriez-vous-pret-a-renoncer-a-l-avion-par-souci-ecologique?id=10432770](https://www.rtbef.be/tendance/green/detail_seriez-vous-pret-a-renoncer-a-l-avion-par-souci-ecologique?id=10432770) (consulté le 24 mars 2021).
- [115] AFTM, « Train versus Avion - Le [nouveau] parcours voyageur », août 2016. [https://teams.microsoft.com/\\_?tenantId=aa321b6e-c2f4-42f8-95b8-4d018e6d28ec#/pptx/viewer/teamsSdk/https%3A~2F~2Fbe4you.sharepoint.com~2Fsites~2FRDBT-PerformanceEnvironnementale~2FShared%20Documents~2FGeneral~2F2-%20R%C3%A9unions%20RCBT~2F20220401%20-%20Suivi%20de%20mission.pptx?threadId=19:fdiUl\\_wRk6Bgu2VEFzJLSMOld\\_TlcMPzHK6t0cK0aMY1@thread.tacv2&subEntityId=%257B%2522web%2522%253A%2522https%253A%252F%252Fbe4you.sharepoint.com%252Fsites%252FRDBT-PerformanceEnvironnementale%2522%252C%2522list%2522%253A%2522https%253A%252F%252Fbe4you.sharepoint.com%252Fsites%252FRDBT-PerformanceEnvironnementale%252FShared%2520Documents%2522%252C%2522folder%2522%253A%2522%252Fsites%252FRDBT-PerformanceEnvironnementale%252FShared%2520Documents%252FGeneral%252F2-%2520R%252C%252A9unions%2520RCBT%2522%257D&fileId=a54dfce6-00fd-4318-9a2e-9b3f94beb124&ctx=openFilePreview&viewerAction=view](https://teams.microsoft.com/_?tenantId=aa321b6e-c2f4-42f8-95b8-4d018e6d28ec#/pptx/viewer/teamsSdk/https%3A~2F~2Fbe4you.sharepoint.com~2Fsites~2FRDBT-PerformanceEnvironnementale~2FShared%20Documents~2FGeneral~2F2-%20R%C3%A9unions%20RCBT~2F20220401%20-%20Suivi%20de%20mission.pptx?threadId=19:fdiUl_wRk6Bgu2VEFzJLSMOld_TlcMPzHK6t0cK0aMY1@thread.tacv2&subEntityId=%257B%2522web%2522%253A%2522https%253A%252F%252Fbe4you.sharepoint.com%252Fsites%252FRDBT-PerformanceEnvironnementale%2522%252C%2522list%2522%253A%2522https%253A%252F%252Fbe4you.sharepoint.com%252Fsites%252FRDBT-PerformanceEnvironnementale%252FShared%2520Documents%2522%252C%2522folder%2522%253A%2522%252Fsites%252FRDBT-PerformanceEnvironnementale%252FShared%2520Documents%252FGeneral%252F2-%2520R%252C%252A9unions%2520RCBT%2522%257D&fileId=a54dfce6-00fd-4318-9a2e-9b3f94beb124&ctx=openFilePreview&viewerAction=view) (consulté le 1 avril 2022).
- [116] N. Lefevre, « Bilan comparé des transports aérien et ferroviaire », p. 6.
- [117] ADEME, « Evaluation des externalités générées par les mobilités touristiques en France », *ADEME*. <https://www.ademe.fr/evaluation-externalites-generees-mobilites-touristiques-france-a-lhorizon-2030> (consulté le 22 mars 2021).
- [118] A. AFP, « Trains de nuit. Une dizaine de lignes pourraient circuler en 2030 », *Ouest-France.fr*, 31 janvier 2021. <https://www.ouest-france.fr/economie/transports/train/trains-de-nuit-une-dizaine-de-lignes-pourraient-circuler-en-2030-7137428> (consulté le 22 mars 2021).
- [119] *LOI n° 2021-1104 du 22 août 2021 portant lutte contre le dérèglement climatique et renforcement de la résilience face à ses effets*. 2021.
- [120] « Rapport Final ». Consulté le: 22 mars 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://propositions.conventioncitoyennepourleclimat.fr/pdf/ccr-rapport-final.pdf>
- [121] P. Chiambaretto, C. Baudelaire, et T. Lavril, « Measuring the willingness-to-pay of air-rail intermodal passengers », *Journal of Air Transport Management*, vol. 26, p. 50-54, janv. 2013, doi: 10.1016/j.jairtraman.2012.10.003.
- [122] ACNUSA, « Pollution avion : pollution atmosphérique avions et activités aéroportuaires », *Acnusa*. <https://www.acnusa.fr/fr/la-pollution-de-lair/pollution-atmospherique-et-activites-aeroportuaires/113> (consulté le 7 avril 2021).
- [123] DGAC, « Rapport Environnement DGAC 2019 », 2020. [En ligne]. Disponible sur: [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)
- [124] ADEME, « Bilan national du programme d'action des aérodromes établi par l'ADEME », 2018. [En ligne]. Disponible sur: [https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/programme-actions-aerodromes\\_2018.pdf](https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/programme-actions-aerodromes_2018.pdf)
- [125] Airparif, « Survol ». <http://survol.airparif.fr/observatoire/quelle-pollution-autour-aeroports> (consulté le 7 avril 2021).



- [126] ATAG, « Reducing noise ». <https://aviationbenefits.org/environmental-efficiency/reducing-noise/> (consulté le 7 avril 2021).
- [127] MTE, « Limiter l'impact sonore de la circulation aérienne », *Ministère de la Transition écologique*. <https://www.ecologie.gouv.fr/limiter-limpact-sonore-circulation-aerienne> (consulté le 7 avril 2021).
- [128] Bruitparif, « Plan d'exposition au bruit (PEB) et urbanisme ». <https://www.bruitparif.fr/plan-d-exposition-au-bruit-peb-et-urbanisme/> (consulté le 7 avril 2021).
- [129] INRA, « Sols artificialisés et processus d'artificialisation des sols : déterminants, impacts et leviers d'action », p. 8, 2017.
- [130] MTE, « Etude et recensement de la biodiversité sur les aéroports », *Ministère de la Transition écologique*. <https://www.ecologie.gouv.fr/etude-et-recensement-biodiversite-sur-aeroports> (consulté le 22 mars 2021).
- [131] Aéro Biodiversité, « Rapport National 2021 ». Décembre 2021.
- [132] RAC, « Projets d'extensions d'aéroports en France : où en est-on ? », 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://reseauactionclimat.org/wp-content/uploads/2021/02/projets-extension-aeroports-loi-climat-reseau-action-climat.pdf>
- [133] Légifrance, « Article 146 - LOI n° 2021-1104 du 22 août 2021 portant lutte contre le dérèglement climatique et renforcement de la résilience face à ses effets (1) », 9 juin 2022. [https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/article\\_jo/JORFARTI000043957218](https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/article_jo/JORFARTI000043957218) (consulté le 9 juin 2022).
- [134] Statista, « Airline alliances - market share in passenger traffic », *Statista*. <https://www.statista.com/statistics/271415/share-of-airline-alliances-in-passenger-traffic/> (consulté le 30 mars 2021).
- [135] Wavestone, « The rise of the long-haul, low-cost carriers : what does it mean for airports ? », 2018. [En ligne]. Disponible sur: [https://www.wavestone.com/app/uploads/2018/09/low-cost\\_aeroport.pdf](https://www.wavestone.com/app/uploads/2018/09/low-cost_aeroport.pdf)
- [136] Fondation pour l'innovation politique et Roland Berger, « Avant le Covid-19, le transport aérien en Europe : un secteur déjà fragilisé », 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.fondapol.org/app/uploads/2020/12/fondapol-etude-combe-brechemier-transport-aerien-avant-covid-12-2020-1.pdf>
- [137] OACI, « La chaîne de valorisation du transport aérien », *6ème réunion de la conférence mondiale de transport aérien*, 2013.
- [138] Airline Economics et KMPG, « The Aviation Industry Leaders Report 2019: Tackling headwinds », p. 60.
- [139] Airbus, « Airbus orders and deliveries », *Airbus*. <https://www.airbus.com/aircraft/market/orders-deliveries.html> (consulté le 30 mars 2021).
- [140] Boeing, « Boeing orders & deliveries ». <https://www.boeing.com/commercial/#/orders-deliveries> (consulté le 30 mars 2021).
- [141] « Cinq mythes sur le transport aérien ». Consulté le: 23 mars 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://reseauactionclimat.org/wp-content/uploads/2019/06/cinq-mythes-sur-le-transport-aerien.pdf>
- [142] OACI, « 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) (consulté le 23 mars 2021).
- [143] World Economic Forum, « Building a Path to Net-Zero Aviation », *World Economic Forum*. <https://www.weforum.org/events/race-to-zero-dialogues-2020/sessions/building-a-path-to-net-zero-aviation/> (consulté le 23 mars 2021).
- [144] OACI, « La Secrétaire générale de l'OACI souligne la transition verte de l'aviation à Davos ». <https://www.icao.int/Newsroom/Pages/FR/ICAO-SG-highlights-aviations-green-transition-at-Davos.aspx> (consulté le 23 mars 2021).
- [145] « Brochure CORSIA ». Consulté le: 23 mars 2021. [En ligne]. Disponible sur: [https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Documents/CORSIA%20Brochure/CorsiaBrochure-FR-Mar2019\\_Web.pdf](https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Documents/CORSIA%20Brochure/CorsiaBrochure-FR-Mar2019_Web.pdf)
- [146] SNPL, « Contribution-des-mesures-visant-à-réduire-les-émissions-de-CO2-Souces-OACI.jpg (Image JPEG, 1743 x 789 pixels) », 2020. <https://snpl.com/wp-content/uploads/2020/09/Contribution-des-mesures-visant-a-CC%80-re-CC%81duire-les-e-CC%81missions-de-CO2-Souces-OACI.jpg> (consulté le 8 avril 2021).

- [147] Climate Action Tracker, « Current Policy Projections », 23 juillet 2020.  
<https://climateactiontracker.org/sectors/aviation/current-policy-projections-2/> (consulté le 8 avril 2021).
- [148] ATAG, « ATAG ». <https://www.atag.org/> (consulté le 8 avril 2021).
- [149] The International Air Cargo Association, « The International Air Cargo Association ». <https://tiaca.org/> (consulté le 8 avril 2021).
- [150] IATA, « IATA ». <https://www.iata.org/en/> (consulté le 8 avril 2021).
- [151] IATA, « Current Airline Members », 9 juin 2022.  
<https://www.iata.org/en/about/members/airline-list/> (consulté le 9 juin 2022).
- [152] Airport Council International World, « ACI World: The voice of the world's airports », *ACI World*. <https://aci.aero/> (consulté le 8 avril 2021).
- [153] EASA, « EASA », EASA. <https://www.easa.europa.eu/landing> (consulté le 8 avril 2021).
- [154] « Stratégie Nationale du Transport Aérien ». Consulté le: 23 mars 2021. [En ligne].  
 Disponible sur: [https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Strategie\\_TA.pdf](https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Strategie_TA.pdf)
- [155] IATA, « Après une année difficile, amélioration prévue pour 2020 », 2019. [En ligne].  
 Disponible sur:  
<https://www.iata.org/contentassets/36695cd211574052b382004411b56de/2019-12-11-01-fr.pdf>
- [156] « Airline Industry Economic Performance - June 2020 - IATA ». Consulté le: 22 mars 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/airline-industry-economic-performance-june-2020-report>
- [157] Pensons l'Aéronautique pour Demain, « Moins d'avions, plus d'emplois ». 31 août 2021.
- [158] ANCRE, « Feuille de route pour le développement de filières biocarburants aéronautiques en France », 2018. [En ligne]. Disponible sur:  
[https://www.allianceenergie.fr/wp-content/uploads/2018/06/synthese\\_ANCRE\\_biocarburants-aviation.pdf](https://www.allianceenergie.fr/wp-content/uploads/2018/06/synthese_ANCRE_biocarburants-aviation.pdf)
- [159] Aviation benefits beyond borders, « Producing sustainable aviation fuel », 2 juin 2022.  
<https://aviationbenefits.org/environmental-efficiency/climate-action/sustainable-aviation-fuel/producing-sustainable-aviation-fuel/> (consulté le 3 juin 2022).
- [160] MTE, « Mise en place d'une filière de biocarburants aéronautiques durables en France », p. 74.
- [161] OACI, « CORSIA Default Life Cycle Emissions Values for CORSIA Eligible Fuels », mars 2021.
- [162] France 24, « Un premier vol long-courrier à l'huile de cuisson pour un avion d'Air France », *France 24*, 18 mai 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> (consulté le 24 avril 2022).
- [163] IATA, « IATA Annual Review 2020 », p. 56, 2020.
- [164] OSFME, « Perspectives d'évolution des biocarburants », 2021.
- [165] CE Delft, *Handbook on the external costs of transport: version 2019*. LU: Publications Office, 2020. Consulté le: 9 juin 2021. [En ligne]. Disponible sur:  
<https://data.europa.eu/doi/10.2832/51388>
- [166] MTE, « Feuille de route française pour le déploiement des biocarburants aéronautiques durables », p. 7, 2020.
- [167] Mc Kinsey, « Clean Skies Tomorrow SAF Analytics », 2020.
- [168] T&E, « Roadmap to decarbonising European aviation », 2018. [En ligne]. Disponible sur:  
[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)
- [169] Clean Sky et FCH, « Hydrogen-powered aviation - A fact-based study of hydrogen technology, economics, and climate impact by 2050 », 2020. [En ligne]. Disponible sur:  
[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)
- [170] Supaero Decarbo, « ZEROe et le monde de demain », *Fichier PDF*. <https://www.fichier-pdf.fr/2020/09/24/zeroe-et-le-monde-de-demain/> (consulté le 9 avril 2021).
- [171] Our World in Data, « Energy », *Our World in Data*, 28 novembre 2020.  
<https://ourworldindata.org/electricity-mix> (consulté le 14 juin 2022).

- [172] IPCC, *Climate Change 2014 Mitigation of Climate Change: Working Group III Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2014. doi: 10.1017/CBO9781107415416.
- [173] SDC, « Retours SDC », 2021.
- [174] « Propulsion des aéronefs », *Wikipédia*. 1 juin 2022. Consulté le: 15 juin 2022. [En ligne]. Disponible sur: [https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Propulsion\\_des\\_a%C3%A9ronefs&oldid=194171454](https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Propulsion_des_a%C3%A9ronefs&oldid=194171454)
- [175] Our World in Data, « Climate change and flying: what share of global CO2 emissions come from aviation? », *Our World in Data*. <https://ourworldindata.org/co2-emissions-from-aviation> (consulté le 11 avril 2022).
- [176] 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.
- [177] 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/> (consulté le 9 avril 2021).
- [178] A. M. Air France KLM, « Document d’enregistrement universel 2020 Air France - KLM », p. 396, 2020.
- [179] Eurocontrol, « Eurocontrol Forecast Update 2021-2027 », 15 octobre 2021. <https://www.eurocontrol.int/publication/eurocontrol-forecast-update-2021-2027> (consulté le 18 novembre 2021).
- [180] ADP, « Quantification des émissions de CO2 et plan d’action 2019 », 2019. [En ligne]. Disponible sur: [https://www.parisaeroport.fr/docs/default-source/groupe-fichiers/rse/rapports-rse/adp-emissions-de-co2-et-plan-d-actions-2019.pdf?sfvrsn=fd49cebd\\_0](https://www.parisaeroport.fr/docs/default-source/groupe-fichiers/rse/rapports-rse/adp-emissions-de-co2-et-plan-d-actions-2019.pdf?sfvrsn=fd49cebd_0)
- [181] J.-L. CORGIER, « Train ou avion, Go Euro fait le point sur la rapidité », *Class Tourisme : Magazine de voyages et d’Art de vivre*, 2016. [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) (consulté le 15 avril 2022).
- [182] France Info, « Comment les trains de nuit ont été effacés de la carte de France (avant un nouveau départ ?) », *Franceinfo*, 26 juillet 2020. [https://www.francetvinfo.fr/economie/transports/sncf/comment-les-trains-de-nuit-ont-ete-effaces-de-la-carte-de-france-avant-un-nouveau-depart\\_4051851.html](https://www.francetvinfo.fr/economie/transports/sncf/comment-les-trains-de-nuit-ont-ete-effaces-de-la-carte-de-france-avant-un-nouveau-depart_4051851.html) (consulté le 15 avril 2022).
- [183] 6-t, « Comprendre les choix et l’expérience des voyageurs en matière de déplacements interurbains ». mai 2019. [En ligne]. Disponible sur: [http://www.qualitetransports.gouv.fr/IMG/pdf/comprendre\\_les\\_choix\\_et\\_l\\_experience\\_de\\_s\\_voyageurs\\_en\\_matiere\\_de\\_deplacements\\_urbains.pdf](http://www.qualitetransports.gouv.fr/IMG/pdf/comprendre_les_choix_et_l_experience_de_s_voyageurs_en_matiere_de_deplacements_urbains.pdf)
- [184] DGAC, « Image du transport aérien en France », 2014. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/EIAC%202013%20VF.pdf>
- [185] Railway Technology, « Covid-19: could the pandemic bolster international rail travel? », *Railway Technology*, 11 août 2020. [https://rail.nridigital.com/future\\_rail\\_jul20/covid-19\\_rail](https://rail.nridigital.com/future_rail_jul20/covid-19_rail) (consulté le 15 avril 2022).
- [186] ADEME, « Des vacances au kilomètre », 2020. <https://multimedia.ademe.fr/infographies/vacances-au-kilometre/> (consulté le 12 avril 2021).
- [187] Chaire PEGASE, « Transport aérien : l’impact du COVID-19 sur le comportement des Français ». décembre 2020. [En ligne]. Disponible sur: [https://251b84c7-b4ea-4c1d-81d7-6c1460292d00.filesusr.com/ugd/3e4751\\_a24364c5232d49d4bc5954fb57d75333.pdf](https://251b84c7-b4ea-4c1d-81d7-6c1460292d00.filesusr.com/ugd/3e4751_a24364c5232d49d4bc5954fb57d75333.pdf)
- [188] OACI, « Environmental trends in aviation to 2050 », p. 7, 2016.
- [189] IEA, « Energy Technology Perspectives 2020 », *IEA*. <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2020> (consulté le 9 avril 2021).
- [190] Boeing, « Commercial Market Outlook 2020-2039 », 2020. [En ligne]. Disponible sur: [https://www.boeing.com/resources/boeingdotcom/market/assets/downloads/2020\\_CMO\\_PDF\\_Download.pdf](https://www.boeing.com/resources/boeingdotcom/market/assets/downloads/2020_CMO_PDF_Download.pdf)
- [191] Airbus, « Global Market Forecast 2019-2038 », *Airbus*. <https://www.airbus.com/aircraft/market/global-market-forecast.html> (consulté le 9 avril 2021).

- [192] Hassan et al., « Framework Development for Performance Evaluation of the Future National Airspace System », 2015. <https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.2015-3187> (consulté le 9 avril 2021).
- [193] Sustainable aviation UK, « Decarbonisation roadmap : a path to net zero », 2020. [En ligne]. Disponible sur: [https://www.sustainableaviation.co.uk/wp-content/uploads/2020/02/SustainableAviation\\_CarbonReport\\_20200203.pdf](https://www.sustainableaviation.co.uk/wp-content/uploads/2020/02/SustainableAviation_CarbonReport_20200203.pdf)
- [194] CCC, « Net Zero - Technical Report », *Climate Change Committee*. <https://www.theccc.org.uk/publication/net-zero-technical-report/> (consulté le 9 avril 2021).
- [195] Onera, « Transport aérien 2050 - Des recherches pour préparer l'avenir », 2010. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.onera.fr/sites/default/files/recherche/brochure-ats2050.pdf>
- [196] Académie de l'air et de l'espace, *Flying in 2050*. Toulouse: Académie nationale de l'air et de l'espace, 2013. [En ligne]. Disponible sur: <https://academieairespace.com/wp-content/uploads/2013/03/D38-Flying-in-2050-ebook.pdf>
- [197] AE4, ACI Europe, ASD, ERA, et CANSO, « Destination 2050 », 2021. [En ligne]. Disponible sur: [https://www.destination2050.eu/wp-content/uploads/2021/03/Destination2050\\_Report.pdf](https://www.destination2050.eu/wp-content/uploads/2021/03/Destination2050_Report.pdf)
- [198] ADEME, « Les scénarios 2030-2050 », *ADEME*. <https://www.ademe.fr/lademe/priorites-strategiques-missions-lademe/scenarios-2030-2050> (consulté le 8 avril 2021).
- [199] IEA, « Net Zero by 2050 - A Roadmap for the Global Energy Sector », p. 224, 2021.
- [200] France Stratégie, « La biomasse agricole : quelles ressources pour quel potentiel énergétique ? », juill. 2021.
- [201] Actu-Environnement, « Nouveau nucléaire : RTE chiffre le pari énergétique d'Emmanuel Macron », *Actu-Environnement*. <https://www.actu-environnement.com/ae/news/nouveau-nucleaire-RTE-chiffre-pari-energetique-macron-39113.php4> (consulté le 9 avril 2022).
- [202] RTE, « Futurs énergétiques 2050 : Principaux résultats », oct. 2021.
- [203] IEA, « World Energy Outlook 2021 », *IEA*, octobre 2021. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/world-energy-outlook-2021-free-dataset> (consulté le 23 février 2022).
- [204] DGAC, « TARMAAC - Extraction des données de trafic pour 2019 », 2022. <https://eco-calculateur.dta.aviation-civile.gouv.fr/comment-ca-marche> (consulté le 11 avril 2022).
- [205] European Commission, « Refuel EU - SAF », juill. 2021.
- [206] T&E, « Big airlines claim net zero future but lobby against climate laws », *Transport & Environment*, 6 avril 2022. <https://www.transportenvironment.org/discover/europes-largest-airlines-claim-net-zero-future-while-lobbying-to-weaken-eus-climate-laws/> (consulté le 8 avril 2022).
- [207] Airbus, « Plan ZEROe et Clean Sky », 24 juin 2021. <https://www.airbus.com/en/innovation/zero-emission/hydrogen/zeroe> (consulté le 7 avril 2022).
- [208] Eurocontrol, « Four year forecast 2021-2024 », mai 2021.
- [209] GIFAS, « Loi Climat et Résilience : pourquoi l'interdiction des vols intérieurs ne changera presque rien », *GIFAS*. <https://www.gifas.fr/press-summary/loi-climat-et-resilience-pourquoi-l-interdiction-des-vols-interieurs-ne-changera-presque-rien> (consulté le 3 juin 2022).
- [210] IATA, « Industry statistics - Fact Sheet - 2021 », oct. 2021.
- [211] InterVISTAS, « Estimating Air Travel Demand Elasticities - Final Report », 2007.
- [212] « Compensation carbone et Treewashing : Jonathan Guyot », *Bon Pote*, 16 septembre 2020. <https://bonpote.com/compensation-carbone-et-treewashing-jonathan-guyot/> (consulté le 11 janvier 2021).
- [213] Pour la solidarité, « Compensation carbone, fausse bonne idée ? », p. 35, 2018.
- [214] Youmatter, « Compensation carbone, reforestation : quelle efficacité écologique ? », *Youmatter*, 15 décembre 2020. <https://youmatter.world/fr/compensation-ecologique-efficacite-avantages-inconvenients/> (consulté le 8 avril 2021).
- [215] BIA FWI Chevalier de Saint Georges, « Les différentes phases d'un vol [Le monde de l'aviation civile] ». [https://biasxm.scenari-community.org/BIASXM/Enac/Introduction\\_web/co/6\\_DifferentesPhaseVol.html](https://biasxm.scenari-community.org/BIASXM/Enac/Introduction_web/co/6_DifferentesPhaseVol.html) (consulté le 3 juin 2022).



- [216] « Energy Technology Perspectives 2017 », p. 441, 2017.
- [217] CDP, WRI, WWF, et UNGC, « Aviation sector », *Science Based Targets*. <https://sciencebasedtargets.org/sectors/aviation> (consulté le 10 juin 2022).
- [218] MTE, « Synthèse scénario de référence SNBC-PPE.pdf », 2018.
- [219] MTE, « Le paysage dans les documents d'urbanisme », *Ministères Écologie Énergie Territoires*. <https://www.ecologie.gouv.fr/paysage-dans-documents-durbanisme> (consulté le 29 juillet 2022).
- [220] C. Voigt et al., « Cleaner burning aviation fuels can reduce contrail cloudiness », *Commun Earth Environ*, vol. 2, n° 1, Art. n° 1, juin 2021, doi: 10.1038/s43247-021-00174-y.
- [221] R. Teoh, U. Schumann, A. Majumdar, et M. E. J. Stettler, « Mitigating the Climate Forcing of Aircraft Contrails by Small-Scale Diversions and Technology Adoption », *Environ. Sci. Technol.*, vol. 54, n° 5, p. 2941-2950, mars 2020, doi: 10.1021/acs.est.9b05608.
- [222] F. Yin, V. Grewe, C. Frömming, et H. Yamashita, « Impact on flight trajectory characteristics when avoiding the formation of persistent contrails for transatlantic flights », *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 65, p. 466-484, déc. 2018, doi: 10.1016/j.trd.2018.09.017.
- [223] R. L. Rowe, N. R. Street, et G. Taylor, « Identifying potential environmental impacts of large-scale deployment of dedicated bioenergy crops in the UK », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, n° 1, p. 271-290, janv. 2009, doi: 10.1016/j.rser.2007.07.008.
- [224] J. Dauber et al., « Yield-biodiversity trade-off in patchy fields of *Miscanthus x giganteus* », *GCB Bioenergy*, vol. 7, n° 3, p. 455-467, 2015, doi: 10.1111/gcbb.12167.
- [225] R. Stratton, P. Wolfe, et J. Hileman, « Impact of Aviation Non-CO2 Combustion Effects on the Environmental Feasibility of Alternative Jet Fuels », *Environmental science & technology*, vol. 45, p. 10736-43, nov. 2011, doi: 10.1021/es2017522.
- [226] INSEE, « Élaboration des statistiques annuelles d'entreprises | Insee », 23 mars 2022. <https://www.insee.fr/fr/metadonnees/source/serie/s1188> (consulté le 23 mars 2022).
- [227] CGDD, « Chiffres clés du transport - Édition 2021 », *Données et études statistiques pour le changement climatique, l'énergie, l'environnement, le logement, et les transports*. <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/chiffres-cles-du-transport-edition-2021> (consulté le 15 juin 2022).
- [228] CGDD, « Chiffres clés des transports - Édition 2022 », *Données et études statistiques pour le changement climatique, l'énergie, l'environnement, le logement, et les transports*. <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/chiffres-cles-des-transports-edition-2022> (consulté le 15 juin 2022).
- [229] OCDE, « Royaume-Uni : une loi pionnière sur le changement climatique », *OECD*, 6 octobre 2021. <https://www.oecd.org/action-climat/ipac/politiques-en-action/royaume-uni-une-loi-pionniere-sur-le-changement-climatique-5b702655/> (consulté le 2 mars 2022).
- [230] Air France - KLM, « Air France-KLM accélère sa transition environnementale et s'engage, à travers l'initiative Science-Based Targets (SBTi), à se fixer des objectifs conformes à l'Accord de Paris pour limiter le réchauffement climatique », *Air France KLM*, 29 octobre 2021. <https://www.airfranceklm.com/fr/air-france-klm-accelere-sa-transition-environnementale-et-sengage-travers-linitiative-science-based> (consulté le 2 mars 2022).
- [231] « Bilan des émissions de gaz à effet de serre du secteur du tourisme en France », *La librairie ADEME*. <https://librairie.ademe.fr/changement-climatique-et-energie/4688-bilan-des-emissions-de-gaz-a-effet-de-serre-du-secteur-du-tourisme-en-france.html> (consulté le 29 avril 2022).
- [232] ADEME, « Mon Impact Transport ». <https://monimpacttransport.fr/> (consulté le 5 avril 2021).
- [233] IATA, « Passenger CO2 Calculation Methodology - RP 1726 ».
- [234] Commission Européenne, « Proposition du Parlement Européen et du Conseil sur le déploiement d'une infrastructure pour carburants alternatifs et abrogeant la directive 2014/94/UE du Parlement européen et du Conse », juill. 2021.
- [235] Universal Hydrogen, « Product », *Universal Hydrogen*. <https://hydrogen.aero/product/> (consulté le 15 juin 2022).
- [236] EASEE, « EASEE : un programme à destination des aéroports. », *EASEE*. <http://www.easee-aeroport.fr/> (consulté le 13 avril 2021).



# INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES

## Tableaux

Tableau 1 : Périmètres de comptabilisation des émissions de CO <sub>2</sub> dans les différents scénarios.....	14
Tableau 2 : Part de la population qui prend l'avion au moins une fois par an en fonction du niveau de richesse du pays considéré [46] .....	23
Tableau 3 : Estimation de la reprise de trafic aérien par rapport 2019 entre 2022 et 2025 selon les régions du monde [71] .....	30
Tableau 4 : Emissions mondiales du secteur aérien en fonction des périmètres [15] .....	34
Tableau 5 : Evolution des émissions unitaires des vols commerciaux entre 2000 et 2019 [6] .....	34
Tableau 6 : Caractéristiques des traînées de condensation [102] .....	43
Tableau 7 : Estimation du forçage radiatif (RF) de l'aviation issu des révisions bibliographiques : valeurs globales et annuelles en mW.m-2[101] .....	43
Tableau 8 : Emissions du cycle de vie des différents biocarburants [161] .....	64
Tableau 9 : Scénarios étudiés dans le cadre de cette étude .....	76
Tableau 10 : Participants aux ateliers de travail de consultation sur l'étude.....	77
Tableau 11 : Evolution du taux de décarbonation moyen du mix de biocarburants utilisés dans les différents scénarios de transition (sachant que le taux moyen évolue de manière linéaire entre deux décennies) .....	81
Tableau 12 : Potentiel de mobilisation pour chaque projection (kilo tonnes de Matière Sèche) dans le scénario B exploratoire du rapport "La biomasse agricole : quelles ressources pour quel potentiel énergétique ?" de France Stratégie [200] .....	81
Tableau 13 : Poids des différents mix électriques dans le calcul de l'intensité carbone moyenne des mix électriques dans les différentes régions du monde où la production d'électrocarburants est pertinente [204]....	84
Tableau 14 : Proportion des vols pouvant embarquer des électrocarburants dans les scénarios de transition par faisceau (ces proportions restant constantes entre 2019 et 2050) .....	85
Tableau 15 : Mandats d'incorporation de CAD pour les vols au départ de l'Union Européenne en cours de discussion au niveau européen [205].....	86
Tableau 16 : Taux d'incorporation des CAD dans les différents scénarios de transition écologique .....	87
Tableau 17 : Répartition du trafic par type de vols entre 2019 et 2050 dans les différents scénarios de transition .....	88
Tableau 18 : Hypothèses fournies par la DGAC en novembre 2021.....	92
Tableau 19 : Effets annuels des mesures de réduction et de modération du trafic et d'encouragement du report modal sur la croissance annuelle tendancielle du trafic .....	93
Tableau 20 : Taux annuels de croissance du trafic aérien dans le scénario B "Modération du trafic" .....	93
Tableau 21 : Taux annuels de croissance du trafic aérien dans le scénario C "Tous leviers" .....	93
Tableau 22 : Elasticités du trafic par rapport au prix par type de vols [211] .....	96
Tableau 23 : Energie primaire et énergie finale consommée dans les différents scénarios en 2019 et en 2050 (Périmètre « Départs et arrivées France »).....	107
Tableau 24 : Part des émissions HORS AMONT des vols au départ de la France dans les émissions totales françaises en 2050.....	115
Tableau 25 : Part des émissions HORS AMONT des vols au départ et à l'arrivée de la France dans les émissions totales françaises en 2050 .....	116
Tableau 26 : Comparaison des émissions cumulées dans les différents scénarios avec le budget carbone dérivé du scénario B2DS de l'IEA .....	118
Tableau 27 : Part des résidus de culture disponibles et pertinents en 2050 en France utilisés pour produire les biocarburants consommés par les vols au départ de la France.....	119
Tableau 28 : Part de la production électrique nationale mobilisée en 2050 pour produire les électrocarburants et l'hydrogène bas-carbone en consommés par les vols au départ de la France .....	119
Tableau 29 : Méthodologie de hiérarchisation des enjeux environnementaux .....	122
Tableau 30 : Résultats de la hiérarchisation des enjeux environnementaux liés au secteur aérien .....	123
Tableau 31 : Analyse de l'impact des différents leviers de décarbonation du secteur aérien sur l'enjeu "Atténuer le changement climatique" .....	127
Tableau 32 : Analyse de l'impact des différents scénarios sur l'enjeu "Atténuer le changement climatique" .....	128
Tableau 33 : Analyse de l'impact des différents leviers de décarbonation du secteur aérien sur l'enjeu "Qualité et artificialisation des sols & paysages ».....	129
Tableau 34 : Analyse de l'impact des différents scénarios sur l'enjeu "Qualité et artificialisation des sols & paysages" .....	130

Tableau 35 : Analyse de l'impact des différents leviers de décarbonation du secteur aérien sur l'enjeu "Préserver et renforcer la biodiversité et les services écosystémiques" .....	131
Tableau 36 : Analyse de l'impact des différents scénarios sur l'enjeu "Préserver et renforcer la biodiversité et les services écosystémiques" .....	132
Tableau 37 : Analyse de l'impact des différents leviers de décarbonation du secteur aérien sur l'enjeu "Pollution de l'air" .....	133
Tableau 38 : Analyse de l'impact des différents scénarios sur l'enjeu "Pollution de l'air" .....	134
Tableau 39 : Analyse de l'impact des différents leviers de décarbonation du secteur aérien sur l'enjeu "Limiter les nuisances sonores" .....	135
Tableau 40 : Analyse de l'impact des différents scénarios sur l'enjeu "Limiter les nuisances sonores" .....	135
Tableau 41 : Analyse de l'impact des différents leviers de décarbonation du secteur aérien sur l'enjeu "Limiter l'exposition des populations aux risques technologiques" .....	136
Tableau 42 : Analyse de l'impact des différents scénarios sur l'enjeu "Limiter l'exposition des populations aux risques technologiques" .....	136
Tableau 43 : Avantages et limites des deux approches employées pour l'estimation des retombées économiques .....	140
Tableau 44 : Intensités carbone des emplois du secteur aérien en 2050 dans les scénarios de transition .....	145

## Figures

Figure 1 : Objectifs du secteur industriel aéronautique selon l'IATA [21] .....	12
Figure 2 : Le secteur aérien, un secteur en forte croissance et à forte valeur ajoutée dont l'impact climatique devient de plus en plus important.....	12
Figure 3 : Phasage général de l'étude .....	14
Figure 4 : Evolution du transport aérien, voyageurs transportés, 1970 à 2019 (unité : milliard) [1] .....	16
Figure 5 : Evolution du fret aérien, marchandises transportées, 1970 à 2019 (unité : million de tonnes-kilomètres) [27] .....	16
Figure 6 : Taux de croissance annuel du trafic passagers mondial entre 1974 et 2019 (en nombre de passagers transportés) [1].....	16
Figure 7 : Taux de croissance du trafic passagers (aviation commerciale – en nombre de passagers) sur une sélection d'aéroports entre 1985 et 2018 [28].....	17
Figure 8 : Evolution du trafic passagers (aviation commerciale) en millions de passagers sur une sélection d'aéroports entre 1985 et 2018 [28].....	17
Figure 9 : Evolution du trafic passagers en France en nombre de passagers entre 1997 et 2020 (Source : DGAC).....	18
Figure 10 : Nombre de passagers arrivant en France ou partant de France, en millions, par zone géographique, en 2018 [5] .....	19
Figure 11 : Evolution des capacités de trafic passagers avec la France, entre 2013 et 2018 [5] .....	19
Figure 12 : Répartition mondiale de la consommation de carburant pour l'aviation [34] [35] [36] Calculation based on Evers et al., 2004, IATA, 2019, ICCT, 2019, IEA, 2019 .....	20
Figure 13 : Scénarios des trajectoires mondiales de l'augmentation du trafic aérien au niveau mondial en RPK (passagers payants transportés) selon l'ATAG [12] .....	21
Figure 14 : Trajectoires prévisionnelles de croissance du trafic aérien au niveau mondial dans la littérature [12].....	21
Figure 15 : Trajectoires régionales de la croissance du trafic aérien commercial par continent selon le scénario central Waypoint 2050 (en RPK ou passagers payants transportés) [12] .....	22
Figure 16 : Projection du nombre de passagers (à gauche en millions) transportés en France en 2037 [5] .....	22
Figure 17 : Evolution des émissions des aviations privées et commerciales européennes [52].....	24
Figure 18 : Carte d'identité du passager aérien en France en 2016 [53] .....	25
Figure 19 : Impact de la COVID-19 sur le nombre de connections entre ville – Comparaison entre le mois d'avril 2019 et avril 2020 [83] .....	27
Figure 20 : Impact de la COVID-19 sur la croissance du volume de passagers-kilomètres-payants et de tonne.km [83] .....	28
Figure 21 : Modification du calendrier de livraison des avions de passagers (septembre 2020 contre mars 2020) [88] .....	29
Figure 22 : Comparaison des prévisions du trafic aérien mondial pré- et post-Covid[12] .....	29
Figure 23 : Détail des émissions de CO <sub>2</sub> eq par kg de kérosène en fonction des périmètres de comptabilité.....	32
Figure 24 : Répartition des émissions de CO <sub>2</sub> des vols commerciaux vers et depuis la France en 2019 [6] .....	33
Figure 25 : Passagers-kilomètres réalisés par an dans le monde [87] .....	34
Figure 26 : Evolution des émissions directes de CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> O et CH <sub>4</sub> du secteur aérien en France (Périmètre « Départs France ») [7] .....	35
Figure 27 : Evolution relative des émissions directes de GES du secteur aérien et des émissions totales françaises hors UTCATF par rapport à 2019 (Périmètre « Départs France » - Base 100 en 1990) [7] .....	36
Figure 28 : Baisse des émissions de CO <sub>2</sub> des vols au départ de l'Europe en 2020 par rapport à 2019 [92] .....	36
Figure 29 : Evolution des émissions de différents secteurs (aérien, transports et tous secteurs) [90] sur une base 100 en 1990 .....	38
Figure 30 : Evolution des émissions du secteur aérien dans le scénario AMS 2018 sous-jacent à la SNBC 2.....	38
Figure 31 : Comparaison entre l'empreinte carbone des Français en 2018 en t CO <sub>2</sub> eq par an et par habitant et le budget CO <sub>2</sub> compatible avec les accords de Paris et un réchauffement climatique limité à +2°C .....	39
Figure 32 : Empreinte carbone moyenne en France en 2019 [83] .....	40
Figure 33 : Répartition de l'empreinte carbone moyenne par catégorie de consommation dans l'Union Européenne[86] .....	40
Figure 34 : Illustration des différents impacts "hors CO <sub>2</sub> " de l'aviation sur le climat [26].....	41
Figure 35 : Forçage radiatif effectif global de l'aviation entre 2000 et 2018 [99] .....	44
Figure 36 : Parts relatives des effets de l'aviation sur le forçage radiatif en 2018 .....	44
Figure 37 : Part des différents modes de transport de voyageurs en 2017 en France, selon le nombre de kilomètres parcourus, le temps de trajet et le nombre de trajets (incluant les déplacements à l'étranger) [105] .....	45
Figure 38 : Répartition sectorielle des émissions nationales de GES en 2019 [90] .....	45
Figure 39 : Répartition des émissions nationales de GES du secteur des transports en 2019 [90].....	46

Figure 40 : part des émissions du secteur des transports en France (hors international) [106] .....	46
Figure 41 : Part des émissions des différents moyens de transport dans les émissions du secteur du transport (national + maritime et aérien international) pour différentes années [7].....	46
Figure 42 : Comparaison source ATAG des émissions de CO <sub>2</sub> des différents modes de transport (2014) [12].....	47
Figure 43 : Comparaison source ADEME des émissions de GES des différents modes de transport sur des distances nationales[107] .....	47
Figure 44 : Emissions de CO <sub>2</sub> par heure de transport puis par trajet, en fonction du mode de transport, d'après [112] .....	48
Figure 45 : Les sources d'émissions de polluants sur les plateformes aéroportuaires [122].....	51
Figure 46 : Schéma des différentes phases d'un cycle LTO [125] .....	52
Figure 47 : Evolution des principaux polluants sur les 10 plus grands aéroports français [124] .....	52
Figure 48 : Exemples de mesures pouvant être prises par les aéroports et les compagnies aériennes pour limiter les nuisances à proximités des aéroports (1/2) [127] .....	53
Figure 49 : Exemples de mesures pouvant être prises par les aéroports et les compagnies aériennes pour limiter les nuisances à proximités des aéroports (2/2) [127] .....	53
Figure 50 : Schéma de fonctionnement du secteur du transport aérien et exemple d'acteurs correspondants.....	56
Figure 51 : Contribution des mesures visant à réduire les émissions nettes de CO <sub>2</sub> de l'aviation internationale [146] .....	58
Figure 52 : Les cinq leviers pour décarboner les transports, utilisés dans la décomposition des émissions de l'identité de Kaya[105] .....	62
Figure 53 : Exemples de projets de production de CAD en cours dans le monde .....	65
Figure 54 : Evolution de l'intensité du mix électriques des différentes régions du monde basé sur le scénario WEO - APS de l'IEA.....	66
Figure 55 : Evolution du trafic aérien mondial (en noir) et des émissions par passagers-kilomètres payants (en rouge) [175] .....	69
Figure 56 : Comparaison des estimations d'amélioration de l'efficacité énergétique de l'aviation selon différents acteurs.....	70
Figure 57 : Comparaison des estimations de l'amélioration d'efficacité énergétique liées à l'amélioration des opérations selon différents acteurs.....	71
Figure 58 : Evolution de la desserte en train de nuit en France entre 1980 et aujourd'hui [182] .....	73
Figure 59 : 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 [183].....	74
Figure 60 : Evolution des comportements et des intentions des Français avant et après la crise du COVID 19 [187] .....	75
Figure 61 : Aperçu du travail réalisé par les participants lors du deuxième atelier de travail .....	78
Figure 62 : Récits détaillés associés à chacun des scénarios.....	79
Figure 63 : Leviers de décarbonation du secteur aérien mobilisés dans chacun des scénarios .....	80
Figure 64 : Evolution de l'intensité carbone moyenne du mix électrique dans les différentes régions du monde (Scénario APS - WEO 2021 - IEA) [203].....	83
Figure 65 : Répartition des pays par régions dans l'édition 2021 du WEO de l'AIE [203] .....	83
Figure 66 : Evolution de l'intensité carbone moyenne des mix électriques dans les différentes régions du monde où la production d'électrocarburants est pertinente (gCO <sub>2</sub> /kWh), entre 2030 et 2050 (d'après [203] [35] [107] [172] .....	84
Figure 67 : Evolution du taux de décarbonation des électrocarburants dans les différents scénarios de transition (Périmètre « Départs et arrivées France »).....	86
Figure 68 : Dates de commercialisation des nouvelles générations d'avions dans les différents scénarios de transition (Source : I Care) .....	90
Figure 69 : Prévisions de reprise du trafic suite à la crise sanitaire utilisées dans les scénarios [208].....	92
Figure 70 : Evolution relative du trafic suite à la modération du trafic (en PKTeq - base 100 en 2019 - sans effets prix) .....	94
Figure 71 : Equivalence des coûts des CAD et de l'hydrogène avec celui du kérosène entre 2020 et 2050 - Scénario Destination 2050 [197] .....	95
Figure 72 : Schéma des différentes phases d'un cycle LTO [215] .....	98
Figure 73 : Représentation succincte du fonctionnement du modèle développé dans le cadre de l'étude (Source : I Care) .....	99
Figure 74 : Réductions d'émissions de CO <sub>2</sub> liés à la réduction et à la modération du trafic par rapport aux émissions du trafic de référence .....	101
Figure 75 : Réductions d'émissions de CO <sub>2</sub> liées à l'amélioration des taux de remplissage par rapport aux émissions suite à la réduction et à la modération du trafic .....	101

Figure 76 : Réductions d'émissions de CO <sub>2</sub> liées à l'amélioration des opérations par rapport aux émissions liées à l'amélioration des taux de remplissage .....	102
Figure 77 : Réductions d'émissions de CO <sub>2</sub> liées à l'amélioration de l'efficacité des flottes par rapport aux émissions liées à l'amélioration des opérations .....	103
Figure 78 : Composition du mix énergétique en 2050 (en tep) dans le scénario A - Avec effets prix .....	104
Figure 79 : Consommations des différents types de carburants dans le scénario A en 2019, 2030, 2040 et 2050 (en Mtep – les chiffres en rouge sont ceux qui changent entre les deux graphiques) .....	104
Figure 80 : Composition du mix énergétique en 2050 (en tep) dans le scénario B - Avec effets prix .....	105
Figure 81 : Consommations des différents types de carburants dans le scénario B en 2019, 2030, 2040 et 2050 (en Mtep – les chiffres en rouge sont ceux qui changent entre les deux graphiques) .....	105
Figure 82 : Composition du mix énergétique en 2050 (en tep) dans le scénario C - Avec effets prix .....	106
Figure 83 : Consommations des différents types de carburants dans le scénario C en 2019, 2030, 2040 et 2050 (en Mtep – les chiffres en rouge sont ceux qui changent entre les deux graphiques) .....	106
Figure 84 : Evolution relative des prix des mix énergétiques entre 2020 et 2050 - vols internationaux (base 100 en 2020) .....	108
Figure 85 : Evolutions possibles des niveaux de trafic dans les différents scénarios (en PKTeq - base 100 en 2019) .....	109
Figure 86 : Baisse du trafic suite à l'augmentation des coûts de transport dans les différents scénarios (effets prix médians).....	110
Figure 87 : Evolution relative du trafic (en PKTeq - base 100 en 2019 - avec effets prix).....	110
Figure 88 : Réductions d'émissions de CO <sub>2</sub> liées à l'intégration de CAD et de LH <sub>2</sub> par rapport aux émissions liées à l'amélioration de l'efficacité des flottes (hors effets prix - Périmètre "Départs et arrivées France").....	111
Figure 89 : Réductions d'émissions de CO <sub>2</sub> liées à l'intégration de CAD et de LH <sub>2</sub> par rapport aux émissions liées à l'amélioration de l'efficacité des flottes (hors effets prix - Périmètre "Départs France") .....	111
Figure 90 : Emissions unitaires une fois tous les leviers mobilisés (gCO <sub>2</sub> /PKTeq - amont compris – avec effets prix - Périmètre "Départs et arrivées France").....	112
Figure 91 : Emissions unitaires une fois tous les leviers mobilisés (gCO <sub>2</sub> /PKTeq - amont compris – avec effets prix - Périmètre "Départs France") .....	113
Figure 92 : Evolution des émissions annuelles de CO <sub>2</sub> du secteur aérien une fois tous les leviers mobilisés (millions de tonnes de CO <sub>2</sub> - amont compris – avec effets prix - Périmètre "Départs et arrivées France").....	114
Figure 93 : Evolution des émissions annuelles de CO <sub>2</sub> du secteur aérien une fois tous les leviers mobilisés (millions de tonnes de CO <sub>2</sub> - amont compris – avec effets prix - Périmètre "Départs France") .....	115
Figure 94 : Emissions cumulées de CO <sub>2</sub> du secteur aérien une fois tous les leviers mobilisés (hors amont – avec effets prix - Périmètre "Départs et arrivées France").....	117
Figure 95 : Evolution relative des émissions du secteur aérien par rapport à 2019 une fois tous les leviers mobilisés (millions de tonnes de CO <sub>2</sub> - amont compris – avec effets prix - Périmètre "Départs et arrivées France") .....	118
Figure 96 : Méthodologie de qualification de l'impact des enjeux, illustration sur l'exemple de l'enjeu « nuisances sonores ».....	125
Figure 97 : Synthèse de l'analyse des autres impacts environnementaux des scénarios .....	137
Figure 98 : Périmètre des deux méthodes employées pour l'estimation des retombées économiques du secteur aérien (périmètre des impacts directs pour les deux méthodes, servant de base au calcul des impacts indirects, induits et catalytiques). .....	139
Figure 99 : Approche d'évaluation du contenu en emplois des scénarios grâce à une « analyse entrées-sorties » .....	140
Figure 100 : Evolution de la valeur ajoutée totale générée par les scénarios pour l'intégralité du secteur aérien (périmètre sectoriel élargi) .....	141
Figure 101 : Répartition de la valeur ajoutée totale (périmètre sectoriel élargi) .....	141
Figure 102 : Evolution des emplois totaux générés par les scénarios pour l'intégralité du secteur aérien et répartition par type d'impact (périmètre sectoriel élargi) .....	142
Figure 103 : Répartition des emplois (périmètre sectoriel élargi) .....	142
Figure 104 : Evolution du chiffre d'affaires, de la valeur ajoutée et des emplois générés (périmètre sectoriel restreint) .....	143
Figure 105 : Répartition sectorielle des emplois directs et indirects générés par la mise en œuvre des scénarios en 2050 .....	144
Figure 106 : Répartition sectorielle des emplois du secteur aérien en 2050.....	144
Figure 107 Evolution relative du trafic suite à la réduction et à la modération du trafic (en PKTeq - base 100 en 2019 - sans effets prix) .....	151



## 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
IDDRI	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.

