

Sept
2022


HORIZONS

Elaboration de scénarios de transition écologique du secteur aérien

SYNTHESE

SOMMAIRE

SOMMAIRE.....	2
Figures.....	28
1. CONTEXTE ET METHODOLOGIE	7
1.1. Étapes et méthodologie de l'étude.....	7
1.2. Entretiens et ateliers de travail avec les acteurs.....	7
1.3. Limites et partis pris de l'étude	8
2. SYNTHESE DE L'ETAT DES LIEUX DU SECTEUR AERIEN.....	10
2.1. L'avion, un mode de transport en fort développement.....	10
2.2. Un secteur très concentré et dont les acteurs sont confrontés à des enjeux de rentabilité	10
2.3. L'importance socio-économique de la filière en France	10
2.4. Le défi de la transition environnementale et bas carbone du secteur.....	11
2.5. Un secteur qui peut mobiliser plusieurs leviers pour accomplir sa transition bas-carbone.....	12
3. SYNTHESE DES SCENARIOS ET TRAJECTOIRES DU SECTEUR.....	15
3.1. Scénario A « Rupture technologique » : évolution forte de l'offre	15
3.2. Scénario B « Modération du trafic » : évolution forte de la demande	16
4. ANALYSE DES EXTERNALITES ENVIRONNEMENTALES	18
4.1. Energie et climat.....	18
4.2. Autres enjeux environnementaux	22
5. ANALYSE DES EXTERNALITES SOCIO-ECONOMIQUES.....	25
6. MESURES DE MISES EN ŒUVRE IDENTIFIEES.....	26
CONCLUSION	27

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 CO₂ 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 CO₂, 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, **CO₂ 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-CO₂ 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 ET METHODOLOGIE

L'objectif de cette étude prospective stratégique « Scénarios de transition écologique du secteur aérien » est d'investiguer les chemins possibles de transition écologique de ce secteur à l'échelle nationale, afin d'analyser de manière objective et partagée les enjeux et les potentiels de réduction des impacts environnementaux.

1.1. Étapes et méthodologie de l'étude

L'étude a été réalisée en cinq grandes étapes qui ont été ponctuées de plusieurs temps d'échanges avec des acteurs de la filière au niveau national.

La première étape a consisté à réaliser un état des lieux de la situation actuelle ainsi que des impacts environnementaux et socio-économiques du secteur aérien, en retenant les éléments clés pour éclairer les phases suivantes.

La seconde étape a permis l'identification et la formalisation des principaux leviers de décarbonation disponibles au niveau du secteur aérien. Ce travail a été réalisé sur la base d'une revue de littérature des principaux scénarios prospectifs disponibles à la date de réalisation de la présente étude, complétée par des entretiens et la consultation de nombreuses parties prenantes.

La troisième étape a consisté en l'élaboration de trois visions contrastées de transition écologique du secteur aérien à l'horizon 2050 dans le cadre de trois scénarios coconstruits en collaboration avec la Direction Générale de l'Aviation Civile (DGAC) et la Direction Générale de l'Énergie et du Climat (DGEC). Ces trois scénarios ont été construits en s'appuyant sur les leviers de décarbonation identifiés précédemment, et visent en priorité la décarbonation du secteur. Un modèle a spécifiquement été développé dans le cadre de cette étude pour évaluer l'évolution des émissions de dioxyde de carbone (CO₂) entre 2020 et 2050 dans chacun des scénarios de transition. Il convient de préciser à ce stade que les scénarios construits dans le cadre de cette étude ne sont pas directement liés aux quatre scénarios de l'exercice de prospective « Transition(s) 2050 »¹.

La quatrième étape a permis de quantifier les impacts environnementaux, de manière quantitative pour les émissions de CO₂, et de manière qualitative pour les autres impacts environnementaux. En complément, deux indicateurs socio-économiques ont fait l'objet d'une évaluation indicative : les investissements et les emplois.

Enfin, la dernière étape de cette étude a consisté en l'identification d'un ensemble de mesures publiques et privées permettant de mettre en œuvre la transition écologique du secteur aérien.

Cette étude a été pilotée par I Care en collaboration avec 6t. Au-delà de l'expertise du groupement et des membres du comité de pilotage, l'étude s'est enrichie d'une large revue bibliographique (études, scénarios existants, données statistiques, ...) et de nombreux échanges et ateliers avec des acteurs de la filière.

1.2. Entretiens et ateliers de travail avec les acteurs

Cette étude a été nourrie, pendant plus d'un an et demi, par de nombreuses ressources complémentaires :

- Un état de l'art des connaissances sur les évolutions passées et actuelles du secteur aérien en France, en Europe, et dans un contexte international ;
- L'expertise des membres du groupement sur la filière mais aussi sur la méthodologie de prospective ;
- L'expertise de l'ADEME, et de l'ensemble des parties prenantes qui ont été mobilisés au cours de l'étude.

Les acteurs et experts externes consultés dans le cadre de cette étude sont issus aussi bien des acteurs publics que des acteurs privés du secteur, de la société civile ou du monde de la recherche. Au-delà des entretiens bilatéraux menés au cours de l'étude, les acteurs ont été mobilisés dans le cadre de deux séries de trois ateliers :

- Avec les acteurs de la filière, l'objectif a été de partager l'état des lieux des connaissances disponibles, d'échanger sur les leviers de décarbonation mobilisables et leurs potentiels

¹ <https://transitions2050.ademe.fr/>

respectifs, et enfin de partager les besoins en termes de mesures d'accompagnement pour l'atteinte d'un scénario ambitieux ;

- Avec les membres du comité de pilotage (ADEME, DGAC, DGEC), l'objectif a été de coconstruire trois scénarios prospectifs originaux de décarbonation du secteur entre 2020 et 2050.

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.

Liste des experts et parties prenantes sollicitées au cours de la prospective « Aérien »

- **Ministère** : DGAC, DGEC, Direction des services de la Navigation aérienne (DSNA) ;
- **Autorité administrative indépendante** : Autorité des contrôles des nuisances aéroportuaires (ACNUSA) ;
- **Recherche** : Académie de l'air et de l'espace (AAE), Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique (CITEPA), Isae-Supaéro, Office national d'études et de recherches aérospatiales (ONERA) ;
- **Secteur privé** :
 - Transporteurs : *Board of Airlines Representatives (BAR)*, Fédération nationale de l'aviation Marchande (FNAM), Air France, Transavia ;
 - Constructeurs : GEFAS, *Aerospace Valley*, Airbus, Dassault Aviation, Safran ;
 - Aéroports : *Airport council international Europe (ACI Europe)*, Union des Aéroports Français et Francophones Associés (UAF & FA), Groupe ADP, Groupe Aéroports de la Côte d'Azur, Vinci aéroports.
- **Associations de défense des consommateurs** : Fédération nationale des associations d'usagers des transports (FNAUT), Union français contre les nuisances des aéronefs (UFCNA) ;
- **Associations environnementales** : Aéro-Décarbo, ATECOPOL, Bruitparif, Collectif ICARE, Notre Choix, Réseau Action Climat (RAC), *Stay Grounded*, les 150 (Convention Citoyenne pour le Climat) ;
- **Bureaux d'étude** : Bearing Point, *The Shift Project*, To 70.

1.3. Limites et partis pris de l'étude

L'analyse du secteur aérien s'est faite à l'échelle du territoire national (Métropole et Outre-mer) : cette question territoriale est particulièrement importante, d'une part afin de permettre une articulation avec les méthodologies internationales de comptabilité des émissions de gaz à effet serre (GES), et d'autre part afin d'identifier le potentiel et les limites de certains leviers de décarbonation effectifs du secteur aérien sur le périmètre France. En ce qui concerne les vols comptabilisés, seuls les vols commerciaux de passagers et de fret ont été pris en compte. Les vols privés ou militaires ont donc été exclus du périmètre de l'étude.

Du point de vue opérationnel, les émissions de CO₂ prises en compte de manière quantitative dans le cadre de cette étude concernent la production et la distribution d'énergie consommée dans les vols à destination et au départ de la France², l'utilisation des Groupes auxiliaires de puissance (APU), les phases *Landing and Take Off*³ (LTO) et la phase de croisière (ou plus précisément de demi-croisière). À ces émissions s'ajoutent celles liées aux accès vers et depuis les aéroports, ainsi que les émissions de ces derniers, qui sont prises en compte de manière qualitative. Sont donc exclues de l'étude les émissions liées à la construction des équipements (avions) ou des infrastructures (principalement les aéroports...), au matériel de soutien au sol ou encore à l'extraction et à la fin de vie des matériaux.

Les stratégies des autres pays n'ont pas non plus été prises en compte dans le détail. Or, elles pourraient également être précisées, en particulier sur la question complexe des conséquences de certaines décisions prises à l'échelle nationale en matière de report de trafic (en particulier les effets de fuite).

² L'étude utilise également un autre périmètre de comptabilisation des émissions, où les vols considérés sont uniquement ceux au départ de la France (Périmètre « Départs France »). Pour plus de détails sur ces périmètres, ainsi que sur les résultats obtenus au Périmètre « Départs France », se référer au rapport complet de l'étude.

³ 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.

En ce qui concerne l'évaluation des externalités environnementales des scénarios de transition, une attention particulière a été portée sur l'enjeu climat, et plus particulièrement les émissions de GES. Ainsi, l'enjeu de transition écologique du secteur a été approfondi de manière détaillée (quantitative) sous l'angle de la décarbonation, et de manière qualitative et plus partielle pour les autres enjeux environnementaux. Les externalités socio-économiques des scénarios ont également été évaluées selon une approche qualitative.

2. SYNTHÈSE DE L'ÉTAT DES LIEUX DU SECTEUR AÉRIEN

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

Le secteur aérien est caractérisé par une forte croissance à l'échelle mondiale et française depuis les années 1970, tant en termes de nombre de passagers et de volume de marchandises transportés que de distances parcourues. L'aviation commerciale représente la grande majorité du trafic mondial, avec une prédominance de l'activité « passagers » sur l'activité « fret ». La croissance du trafic passagers a lieu aujourd'hui en majeure partie dans les pays émergents et est soutenue par les offres à bas-coûts dans les pays développés.

Dans le cas particulier de la France, la hausse de trafic aérien depuis 1990 concerne principalement le trafic vers l'international, le trafic intérieur restant relativement stable. La majorité (71%) des passagers arrivant en France provient d'Europe et il en va de même pour les vols qui partent de France.

Bien que le secteur aérien ait été impacté par la pandémie de COVID-19, le trafic amorce une reprise significative dès 2022 au niveau mondial, et pourrait retrouver son niveau de 2019 en 2024 en Europe. Selon les prévisions (notamment de l'Organisation de l'Aviation Civile Internationale - OACI, du Groupe d'action du transport aérien – ATAG, d'Eurocontrol et de la Direction Générale de l'Aviation Civile – DGAC), le trafic aérien de passagers à destination et au départ de la France devrait continuer à s'accroître dans les prochaines décennies, notamment pour les vols internationaux. La crise sanitaire a même conduit à une accélération de la croissance du transport aérien de fret, qui est aujourd'hui portée par le développement du commerce en ligne.

Le fort développement du secteur aérien ne doit pas occulter le fait qu'une minorité des Français (et de la population mondiale) est à l'origine de la plus grande partie de la demande de trafic. En effet, 20% des Français n'ont jamais pris l'avion alors que 36% d'entre eux le prennent au moins une fois par an. Environ 50% des déplacements (privés et commerciaux) en avion en France était en 2008 le fait des 20% des voyageurs ayant les revenus par unité de consommation les plus élevés. En 2016, les catégories socioprofessionnelles les plus favorisées représentaient la moitié des passagers métropolitains. Ainsi, la hausse de l'usage de l'avion en France est fortement liée à l'intensification de l'usage de ce mode de transport par les classes les plus aisées, et pas nécessairement à une démocratisation de son accès.

2.2. Un secteur très concentré et dont les acteurs sont confrontés à des enjeux de rentabilité

Le secteur aérien est une filière très concentrée, mais qui repose également sur de très nombreux sous-traitants. Par exemple, les compagnies aériennes sont en majorité regroupées au sein d'alliances afin de bénéficier d'économies d'échelle importantes. Pour ce qui est des constructeurs d'avions, la quasi-totalité du marché mondial est répartie entre Airbus et Boeing pour les aéronefs commerciaux. Pour les avions plus petits, ce sont Embraer, Bombardier et ATR qui dominent le secteur. Ces entreprises font appel à une myriade de sous-traitants de petites tailles.

Tous les acteurs du secteur aérien sont confrontés à des enjeux de rentabilité, notamment en raison de la crise sanitaire. Les compagnies aériennes sont tout particulièrement fragiles au sein de la chaîne de valeur. Le transport aérien est en effet une activité à gros volume mais à faible marge, du fait notamment de la faiblesse des barrières à l'entrée. Les coûts fixes d'une compagnie aérienne classique (salaires, loyers des avions, entretiens de ceux-ci et dette) sont importants et représentent environ 50% de ses coûts de fonctionnement. La rentabilité des compagnies aériennes est donc fortement dépendante des cours du carburant, mais aussi du taux de remplissage des avions.

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

2.3. L'importance socio-économique de la filière en France

L'aviation est un mode de transport qui joue un rôle clé pour la cohésion du territoire national, en contribuant notamment au développement économique des territoires qu'elle dessert, en particulier pour les Outre-mer. Le secteur aérien est de manière plus générale un levier de croissance pour l'économie française et mondiale.

Ainsi, le chiffre d'affaires total généré en 2019 par l'ensemble du secteur aérien en France s'élevait à 100,9 milliards d'euros. En outre, le secteur **génère de nombreux emplois** ; on en dénombrait 1,1 millions en 2019, dont 342 000 emplois directs (selon l'Air Transport Action Group – ATAG).

Par ailleurs, les marchandises qui transitent par avion sont des **marchandises à haute valeur ajoutée** (tels que 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). Le **fret aérien représente 35% des échanges de marchandises en valeur** pour seulement 1% en volume à l'échelle mondiale.

2.4. Le défi de la transition environnementale et bas carbone du secteur

Actuellement, il existe une **corrélation positive** entre les émissions de GES (principalement du CO₂) du secteur et la **quantité de trafic aérien** (que ce soit en volume de passagers, volume de marchandises transportées, et distance parcourue).

Entre 1990 et 2019, les émissions de GES liées aux vols intérieurs et internationaux au départ de la France sont ainsi passées de 13,1 à 24,2 millions de tonnes de CO₂eq (convention « croisières complètes », hors émissions amont), soit une augmentation de +85,0% sur cette période. Dans le même temps, les émissions territoriales françaises (hors secteur des terres ou UTCATF) ont baissé de 19,9%. **Par conséquent, la part des émissions de GES générées par les vols internationaux et intérieurs au départ de la France est passée de 2,4% à 5,3%⁴ des émissions de GES françaises entre 1990 et 2019 (Figure 1).**

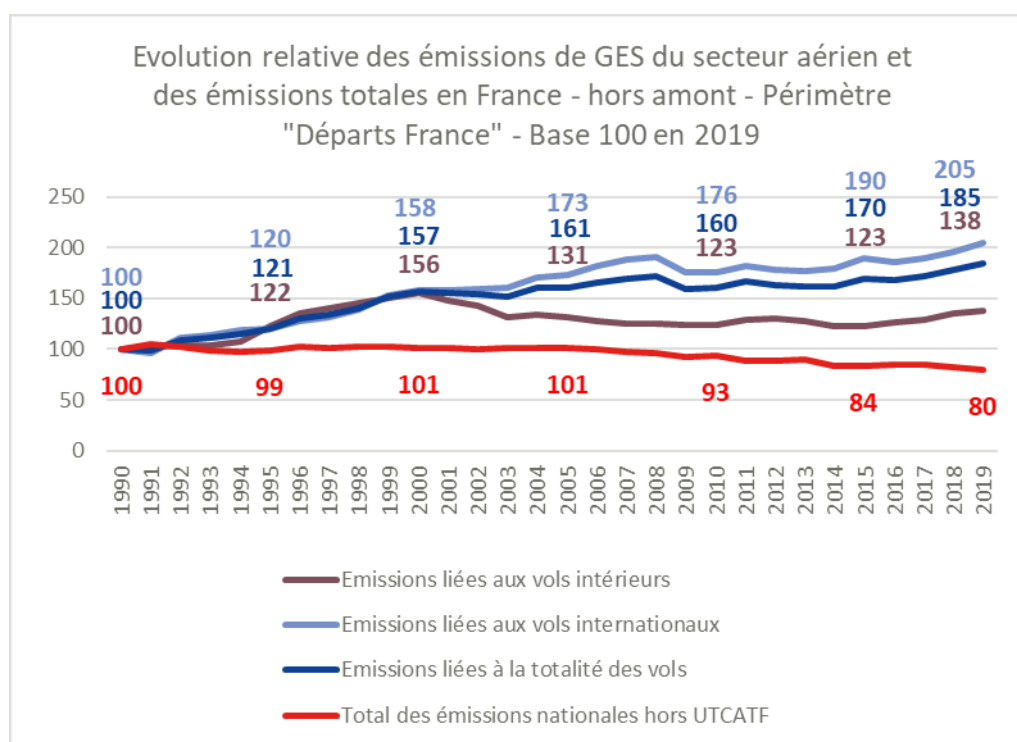


Figure 1 : Evolution relative des émissions directes de GES du secteur aérien et des émissions totales françaises hors secteur des terres par rapport à 2019 (Périmètre « Départs France » - Base 100 en 1990)

Par ailleurs, les vols internationaux représentaient l'immense majorité (79,4%) des émissions de CO₂ des vols commerciaux vers et depuis la France en 2019. En ce qui concerne les vols intérieurs, plus de la moitié des émissions sont liées au trafic entre la Métropole et les Outre-Mer ; ce trafic représentant environ 11,6% des émissions de CO₂ des vols commerciaux vers et depuis la France en 2019. Les vols intérieurs en métropole ne représentaient ainsi que 9,0% des émissions en 2019 (Figure 2).

⁴ En 2019, selon l'inventaire SECTEN 2021 du CITEPA, les émissions de GES liées aux vols intérieurs s'élevaient à 5,6 millions de tonnes de CO₂eq (MtCO₂eq) et celles liées aux vols internationaux au départ de la France à 18,8 MtCO₂eq (émissions hors amont - convention croisières complètes). Selon cet inventaire, les émissions du secteur aérien s'élevaient donc à 24,2 MtCO₂eq en 2019, et les émissions territoriales françaises à 436,0 MtCO₂eq (hors secteur des terres). En 2019, les émissions du secteur aérien représentaient donc 5,3% des émissions territoriales françaises auxquelles sont ajoutées les émissions des soutes internationales (soit 436,0+18,8=454,8MtCO₂eq). Un calcul similaire est effectué pour l'année 1990.

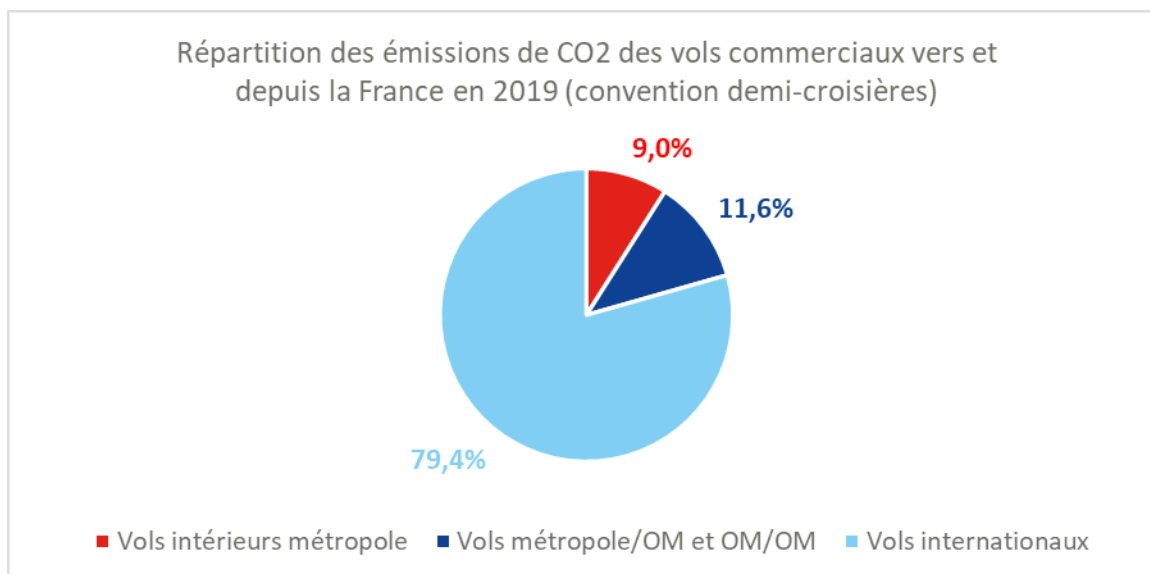


Figure 2 : Répartition des émissions de CO₂ des vols commerciaux vers et depuis la France en 2019

L'efficacité des flottes aériennes s'est beaucoup améliorée depuis 1960. La quantité de carburant consommée par les avions pour transporter un passager sur une distance donnée, et donc les émissions de CO₂ générées pour assurer ce transport, ont ainsi diminué en moyenne de -25,2% entre 2000 et 2019. Ces progrès n'ont cependant pas été suffisants pour réduire les émissions absolues de CO₂ du secteur aérien, puisqu'ils ont été largement compensés par la hausse du trafic.

Enfin, les vols sont à l'origine de la formation de trainées de condensation, qui pourraient influencer grandement sur la physique du climat. L'impact de ces trainées ainsi que des autres effets « hors CO₂ » du secteur aérien est aujourd'hui associé à une incertitude scientifique élevée mais pourrait représenter une contribution majeure au réchauffement climatique. Selon certaines estimations, la prise en compte des effets des trainées de condensation pourrait à elle seule conduire à un doublement des impacts de l'aviation sur le climat (il s'agit par exemple de la valeur retenue dans la [Base Carbone⁵ de l'ADEME](#)).

2.5. Un secteur qui peut mobiliser plusieurs leviers pour accomplir sa transition bas-carbone

Pour diminuer ses émissions de CO₂, plusieurs voies de décarbonation peuvent être envisagées au niveau du secteur aérien, qui dispose de plusieurs leviers qui ne sont pas rigoureusement indépendants :

- La réduction du niveau de trafic aérien ;
- Le report modal ;
- L'augmentation du taux de remplissage des avions ;
- L'augmentation de l'efficacité énergétique des flottes aériennes ;
- La baisse de l'intensité carbone de l'énergie consommée par les avions.

La « compensation » des émissions de CO₂ n'est pas un des leviers de décarbonation utilisé pour diminuer les émissions dans les scénarios de transition. En effet, les projets de compensation carbone ne réduisent pas les émissions sur le périmètre de cette étude.

La réduction du trafic, un levier efficace disponible à court terme mais qui est confronté à des enjeux socio-économiques et d'acceptabilité

La réduction du niveau de trafic aérien peut être soit absolue soit relative. Dans ce dernier cas, elle correspond à une réduction relative (ou « modération ») du niveau de trafic par rapport à un niveau de trafic de référence. Différentes circonstances peuvent activer ce levier : une sobriété « **subie** » par des événements extérieurs (comme la pandémie de COVID-19), une sobriété **volontaire** (par un engagement éco-responsable des individus et des entreprises), ou une sobriété **régulée** (par des normes, des lois, des mécanismes de marché, ou encore par l'augmentation du prix des billets). Il s'agit d'un levier disponible à court terme, mais qui n'a été que très peu utilisé à ce jour au niveau international. Il peut, a priori, être appliqué avec une certaine flexibilité et donc être ajusté à la hausse ou à la baisse en fonction des résultats souhaités, et des progrès technologiques effectivement déployés. Son efficacité est très forte, même si des effets de fuite pourraient être observés. En revanche, la mobilisation de ce levier a un impact sur les

⁵ <https://bilans-ges.ademe.fr/>

compagnies aériennes, les aéroports et leurs partenaires du transport aérien puisqu'elle impacte directement leur niveau d'activité. En cas de réduction ou de modération du trafic, ces acteurs devraient donc envisager des changements stratégiques. Le volume d'emplois liés aux activités aériennes pourrait s'en trouver affecté. Le recours à ce levier pourrait également avoir un impact à terme sur l'activité des constructeurs aéronautiques ; toutefois, il ne sera significatif que si le levier est utilisé sur un périmètre géographique étendu (plus large que la France). L'acceptabilité par les voyageurs de la mise en place de mesures de réduction ou de modération du niveau de trafic aérien est également un enjeu pour ce levier. En effet, cette mise en place peut impliquer une limitation de l'usage actuel de l'avion de l'ensemble ou d'une partie de la population française (même si l'usage régulier de l'avion est le fait d'une faible part (36%) des Français) ainsi que des destructions d'emplois et/ou des reconversions professionnelles en cas de baisse absolue du niveau de trafic.

Le report modal, un levier qui repose sur le développement d'une offre de transport ferroviaire alternative à l'avion pour certains voyages

Le report modal de tout ou partie du trafic vers des modes de transports moins émetteurs (notamment le transport ferroviaire) permet de diminuer les émissions du secteur aérien. Il s'agit d'un levier de plus ou moins long terme, puisqu'il nécessite le développement d'une offre de transport alternative à l'avion pour certains voyages, ce qui pourrait par exemple passer par l'augmentation de l'offre sur les lignes existantes (accroissement des fréquences, réouverture de trains de nuit) ou la construction de nouvelles lignes à grande vitesse.

L'augmentation du taux de remplissage des avions, un levier activable à court terme

L'augmentation du taux de remplissage des avions, en minimisant le nombre de sièges vides par avion, permet d'augmenter le nombre de sièges (et donc de passagers) par avion, diminuant ainsi la quantité de vols nécessaires pour transporter la même quantité de passagers. Il s'agit par conséquent d'un levier de décarbonation activable à court terme pour minimiser le nombre de sièges vides par avion.

L'augmentation de l'efficacité énergétique des flottes, un levier qui nécessite principalement de développer de nouveaux modèles d'avions plus performants

Il est possible de diminuer l'énergie nécessaire pour faire voler la flotte d'avions en service en développant de nouveaux avions plus performants qui viendraient remplacer les appareils les moins performants au sein de la flotte actuelle. Il s'agit d'un levier de moyen et long terme. En effet, il repose sur le développement de nouvelles générations d'avions 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 en moyenne.

Les émissions peuvent également être réduites grâce à l'amélioration des opérations réalisées en vol ou au sol qui permet de diminuer à plus court terme la consommation énergétique des flottes aériennes.

La baisse de l'intensité carbone de l'énergie, un levier qui nécessite d'importants investissements pour être mis en œuvre

La baisse de l'intensité carbone du mix énergétique consiste à remplacer le kérosène par des sources d'énergies bas-carbone, 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 certains résidus de culture et d'agroforesterie), les **électrocarburants** (produits à partir de CO₂ capturé à la sortie de sites industriels et d'électricité bas-carbone), l'hydrogène bas-carbone (produit à partir d'électricité bas-carbone) et **l'électricité**. L'utilisation de ces énergies alternatives au kérosène doit dépendre de leur réel pouvoir « décarbonant », de leur disponibilité, des capacités mondiales et nationales de production, et des externalités négatives associées. 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. Il s'agit encore une fois d'un levier de moyen et long terme.

L'amélioration de l'efficacité énergétique et la baisse de l'intensité carbone du mix énergétique : deux leviers qui peuvent conduire à une augmentation du prix des billets et donc à une baisse de la demande

La mobilisation des leviers de l'amélioration de l'efficacité énergétique et de la baisse de l'intensité carbone du mix énergétique nécessitera des investissements publics et privés conséquents, ce qui aura 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 plus 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) coûtaient en 2019 en moyenne quatre fois plus cher que le kérosène. Leurs coûts, ainsi que celui de l'hydrogène bas-carbone, devraient rester bien au-dessus de celui du kérosène, et ce jusqu'en 2050. Le recours à ces deux leviers risque donc de provoquer une hausse des prix des billets, dans un contexte où les compagnies aériennes

réalisent peu de marges, et donc à une baisse de la demande. Cette baisse de la demande consécutive à la hausse du prix des billets est intitulée « effets prix » dans la suite de cette synthèse.

Des effets prix qui peuvent néanmoins être atténués par des subventions publiques, à la condition que celles-ci n'induisent pas une hausse des émissions du secteur

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. Subventionner le secteur aérien pour atténuer les effets prix pourrait potentiellement conduire à une hausse des émissions cumulées de CO₂ 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).

3. SYNTHÈSE DES SCÉNARIOS ET TRAJECTOIRES DU SECTEUR

En collaboration étroite avec la DGAC et la DGEC, l'ADEME a construit trois scénarios contrastés qui traduisent trois visions, et donc trois trajectoires différentes de transition écologique pour le secteur aérien à horizon 2050. Ces scénarios n'ont pas pour objet de prédire de manière exacte l'évolution du secteur aérien et de ces impacts d'ici 2050 ; ils permettent d'explorer trois trajectoires contrastées de transition, et ainsi contribuer au projet autour de la transition environnementale en générale, et de la décarbonation en particulier de ce secteur.

- **Scénario intitulé « Rupture technologique » ou « SA »** : Des investissements importants sont réalisés dans l'aéronautique. Ces investissements permettent des ruptures technologiques et le déploiement rapide des nouvelles technologies développées (nouveaux modèles d'avions extrêmement performants, avions à propulsion à hydrogène, production très importante de CAD bas-carbone), afin de conserver un niveau de trafic élevé et de permettre au secteur de poursuivre sa croissance économique ;
- **Scénario intitulé « Modération du trafic » ou « SB »** : Des mesures de modération du trafic sont mobilisées pour minimiser les émissions cumulées entre 2020 et 2050 et réduire nettement les émissions d'ici 2030. Ce scénario s'appuie modérément sur les leviers technologiques (efficacité et baisse de l'intensité carbone du mix énergétique).
- **Scénario intitulé « Tous leviers » ou « SC »** : Ce scénario propose un recours mesuré aux différents leviers disponibles, afin de réduire la dépendance à des technologies de rupture potentiellement très coûteuses, mais aussi faciliter l'acceptabilité des mesures de modération du trafic.

En complément de ces scénarios, un scénario complémentaire de référence intitulé « Scénario de référence » ou « S0 » a été formalisé. Ce scénario présente une poursuite des tendances actuelles, sans modération du trafic ou déploiement de technologies allant au-delà des technologies déjà maîtrisées actuellement.

Les scénarios A et B sont présentés ci-après.

3.1. Scénario A « Rupture technologique » : évolution forte de l'offre

Des investissements importants dans la recherche et le développement de nouveaux avions qui permettent des progrès correspondants aux prévisions les plus optimistes du secteur

Dans le scénario A « Rupture technologique », les importants investissements publics et privés dans la recherche et le développement de nouveaux appareils permettent leur commercialisation dès 2035, et ces appareils sont associés à des innovations de rupture (nouveaux moteurs, changement de la forme des avions, diminution de leur masse...) 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.

Un avion court-courrier à hydrogène commercialisé dès 2035

Dans ce scénario, les investissements dans la recherche se portent également sur le développement d'avions court-courriers à propulsion à hydrogène (à partir d'hydrogène liquide). Ces avions sont commercialisés à partir de 2035, ce qui correspond à la date la plus optimiste avancée par Airbus aujourd'hui.

Un renouvellement accéléré des flottes tous les 20 ans

Les investissements du secteur permettent également d'accélérer le renouvellement de la flotte aérienne mondiale. Ainsi, celle-ci est renouvelée en intégralité au bout de 20 ans, au lieu de 25 ans aujourd'hui.

Des investissements élevés dans la production et la distribution de CAD et d'hydrogène bas-carbone qui permettent d'approvisionner de manière très importante les flottes aériennes

Les pouvoirs publics et le secteur privé investissent de manière rapide et importante dans les capacités de production de CAD et d'hydrogène bas-carbone. Ces investissements permettent de développer rapidement les installations de production industrielles et les gisements de ressources nécessaires à la production des carburants alternatifs, c'est-à-dire notamment les résidus de culture et d'agroforesterie pour les biocarburants d'aviation durable, l'électricité bas-carbone pour les électrocarburants et l'hydrogène bas-carbone ainsi que le CO₂ capturé à la sortie d'installations industrielles pour les électrocarburants.

Ces investissements élevés permettent d’approvisionner de manière importante la flotte mondiale en CAD (et en hydrogène bas-carbone pour les avions à propulsion à hydrogène). En 2050, les avions embarquent tous 28% de biocarburants permettant des réductions d’émissions très élevées (qui correspondent aux prévisions les plus optimistes disponibles aujourd’hui).

Par ailleurs, il est supposé dans tous les scénarios de transition qu’aucun volume de CAD ou d’hydrogène bas-carbone n’est importé ou exporté⁶. Ceci implique que les réductions éventuelles d’émissions liées à la substitution de kérosène par des électrocarburants ou de l’hydrogène bas-carbone dépendent de l’intensité carbone du mix électrique du pays où ils sont produits. **Par conséquent, la production d’électrocarburants n’est pas nécessairement un levier pertinent de décarbonation pour tous les vols.** Cette réserve s’applique notamment aux vols au départ des Outre-mer, de l’Amérique du Nord, de l’Asie, de l’Afrique et de l’Océanie, puisque ces régions et pays ne disposeraient pas d’ici 2050 de mix électriques suffisamment bas-carbone au vu de leurs engagements climatiques actuels.

Par conséquent, seuls les vols au départ de la France métropolitaine, de « l’Europe » (l’Union Européenne plus quelques pays comme le Royaume-Uni ou Israël) et de l’Amérique du Sud embarquent des électrocarburants. En 2050, ces vols embarquent 22% d’électrocarburants s’ils sont certifiés pour embarquer 50% de CAD, et 53% s’ils sont certifiés pour en embarquer 100%.

Des investissements qui permettent de ne pas modifier les comportements et modes de vie mais qui conduisent à une hausse tangible du prix des billets et donc à un ralentissement du trafic par rapport au scénario de référence

Dans le scénario A « Rupture technologique », les comportements et modes de vie restent identiques à ceux actuels, et aucune mesure de modération du trafic n’est mise en place. En résumé, les Français prennent donc plus l’avion pour aller à l’étranger, et la France accueille plus de voyageurs étrangers.

Cependant, le renouvellement accéléré des flottes avec des avions très performants et la substitution du kérosène par des CAD ou de l’hydrogène bas-carbone coûtent cher aux compagnies aériennes. Celles-ci voient leurs dépenses d’opération augmenter de manière substantielle, et augmentent donc le prix des billets pour conserver une activité rentable. Par conséquent, la croissance du niveau de trafic est ralentie par rapport au scénario de référence S0.

3.2. Scénario B « Modération du trafic » : évolution forte de la demande

Un recours à des mesures de modération du trafic qui permettent une stabilisation du trafic entre 2019 et 2050 et une diminution des émissions à court terme

Dans le scénario B « Modération du trafic », des changements de comportement volontaires (par un engagement éco-responsable des individus et des entreprises) et des mesures prises au niveau national (par exemple la suppression des exemptions fiscales accordées au secteur aérien ou le plafonnement du nombre de vols par aéroport), permettent de diminuer légèrement le niveau de trafic entre 2023 et 2030, puis de le faire remonter légèrement entre 2031 et 2050. A cet horizon, le niveau de trafic (hors effets prix voir plus loin) est légèrement supérieur à son niveau de 2019 (Figure 3).

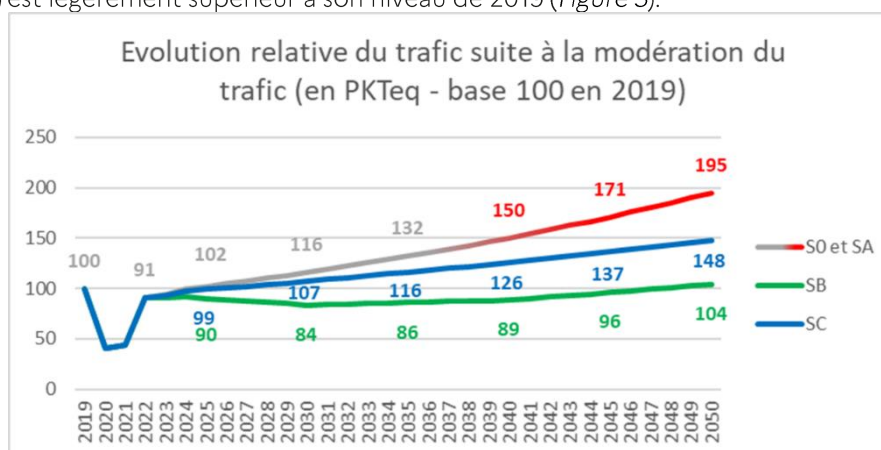


Figure 3 : Evolution relative du trafic suite à la modération du trafic (en PKTeq⁷ - base 100 en 2019 - sans effets prix)

⁶ Il s’agit d’une hypothèse de modélisation qui permet de simplifier les calculs, et qui permet de représenter le fait que la production d’électrocarburants ne sera pas pertinente à l’horizon 2050 du point de vue climatique dans certains pays où l’intensité carbone moyenne du mix électrique sera encore trop élevée.

⁷ 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

Des investissements plus modérés dans le développement de nouveaux appareils et le renouvellement des flottes que dans le scénario A qui se traduisent par des gains d'efficacité moins importants

Les investissements dans les nouveaux modèles d'avions sont plus modérés dans le scénario B « Modération du trafic » que dans le scénario A « Rupture technologique ». Par conséquent, les nouveaux modèles d'avions à kérosène apparaissent en 2040. Ces nouveaux modèles ne mobilisent pas des technologies de rupture, et sont 20% plus efficaces que ceux de la génération actuelle. Aucun avion à hydrogène n'est développé. Enfin, le rythme de renouvellement des flottes reste identique à celui actuel.

Une maîtrise de la demande en trafic qui permet une intégration proportionnellement plus élevée de CAD dans les avions malgré des investissements moins importants dans les capacités et les technologies de production de ces carburants

La mise en place d'action de modération du niveau de trafic aérien permet de réduire la demande en énergie dans le scénario B par rapport au scénario A. Ainsi, malgré des investissements moindres que dans le scénario « Rupture technologique », les avions embarquent proportionnellement plus de CAD dans le scénario « Modération du trafic ». En 2050, tous les avions embarquent en moyenne 50% de biocarburants, et les avions certifiés pour embarquer 100% de CAD au départ de la France métropolitaine, de « l'Europe » et de l'Amérique du Sud embarquent en plus en moyenne 50% d'électrocarburants.

Des effets prix qui contribuent à la modération du trafic entre 2023 et 2050

L'intégration poussée de CAD, ainsi que dans une moindre mesure le renouvellement des flottes avec des nouveaux modèles d'avions plus chers, conduisent à une augmentation des dépenses d'opération des compagnies aériennes et donc à une augmentation du prix des billets. Par conséquent, le niveau de trafic baisse entre 2023 et 2030, se stabilise entre 2031 et 2040 puis remonte légèrement entre 2041 et 2050 pour atteindre à cet horizon un niveau inférieur à son niveau de 2019.

La *Figure 4* illustre les différences majeures des scénarios SC et S0 avec les deux autres scénarios présentés précédemment.

4. ANALYSE DES EXTERNALITES ENVIRONNEMENTALES

L'analyse des externalités environnementales a été menée de manière différenciée dans le cadre de cette étude, avec une analyse quantitative pour l'enjeu des émissions de CO₂, et une analyse qualitative pour les autres enjeux environnementaux.

4.1. Energie et climat

Pour rappel, le périmètre étudié comprend la production et la distribution d'énergie, l'utilisation des groupes auxiliaires de puissance (APU), les phases *Landing and Take Off* (LTO) et la phase de croisière (ou de demi-croisière). Un modèle spécifique a été développé, basé sur les émissions historiques de CO₂ du secteur entre 2015 et 2019. Ce modèle calcule leur évolution entre 2019 et 2050 en fonction d'une série d'hypothèses et de paramètres d'entrée. Sont donc notamment exclus de la modélisation les paramètres suivants : cycle de vie de l'avion (extraction des matériaux, fin de vie...), construction des infrastructures (principalement les aéroports) fonctionnement des équipements de soutien au sol, trajets vers et depuis les aéroports, exploitation des aéroports.

Les consommations de kérosène resteront significatives en 2050

Pour les vols au départ et à l'arrivée de la France en 2050, la part de kérosène embarquée par les avions sera en moyenne de 29% (scénario A « Rupture technologique ») à 43% (scénario C « Tous leviers »). Cette présence du kérosène dans le mix énergétique du secteur en 2050 est notamment liée à **l'absence de disponibilité d'électrocarburants bas-carbone** dans certaines zones géographiques, et notamment pour les vols intérieurs et internationaux au départ de l'Outre-mer, ou encore les vols internationaux au départ d'Amérique du Nord, d'Afrique, d'Asie, et d'Océanie.

Les consommations d'hydrogène bas-carbone resteront mineures dans tous les scénarios

L'hydrogène bas-carbone ne représente au mieux qu'une fraction mineure de l'énergie consommée en 2050, puisque cette énergie n'est pertinente que pour les vols de moins de 2.000 km (qui représentaient moins de 10% du trafic en 2019) et qu'il restera des avions court-courriers à kérosène à cet horizon temporel au vu des rythmes de renouvellement des flottes.

Le développement des capacités de production de CAD à destination du secteur doit être planifié pour gérer au mieux les potentiels conflits d'usages sur certaines ressources en résidus de culture et en électricité bas-carbone

Les résidus de culture et d'agroforesterie, et l'électricité bas-carbone, sont des ressources rares et nécessaires à la transition bas-carbone de nombreux secteurs de l'économie française, comme par exemple le transport routier. Choisir d'approvisionner massivement le secteur aérien en CAD impliquera une tension accrue sur certaines ressources et certains gisements disponibles et mobilisables. Par exemple, au moins **20% des résidus de culture** et de **8% à 17% de l'électricité bas-carbone** disponibles en 2050 devraient être affectés au secteur aérien dans les scénarios.

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





















S0 « Scénario de référence »	SA Scénario « Rupture technologique »	SB Scénario « Modération du trafic »	SC Scénario « Tous leviers »
<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 4 : Récits détaillés associés à chacun des scénarios

Des arbitrages forts sont nécessaires afin de flécher les ressources disponibles vers les différents secteurs pour lesquels ces ressources sont nécessaires afin d'atteindre des objectifs ambitieux de décarbonation. Ces arbitrages peuvent être facilités par une planification et des investissements durables qui permettront de développer de manière rapide et suffisante les gisements de ces ressources.

L'amélioration de l'efficacité énergétique des avions et la baisse de l'intensité carbone du mix énergétique sont deux leviers techniques efficaces de moyen et long terme pour réduire les émissions unitaires du secteur

Il est possible de diminuer significativement les émissions unitaires des vols entre 2019 et 2050 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 (Figure 5).

Ce sont néanmoins des leviers qui ne produiront des effets qu'à moyen et 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 complet des appareils ne se fera 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 CAD, production qui nécessite des investissements élevés dès aujourd'hui pour permettre le développement de filières industrielles qui n'existent pas actuellement.

Le développement rapide de moteurs certifiés compatibles avec un mix composé de 100% de CAD est par ailleurs essentiel pour ne pas limiter la capacité future des flottes aériennes à embarquer des CAD.

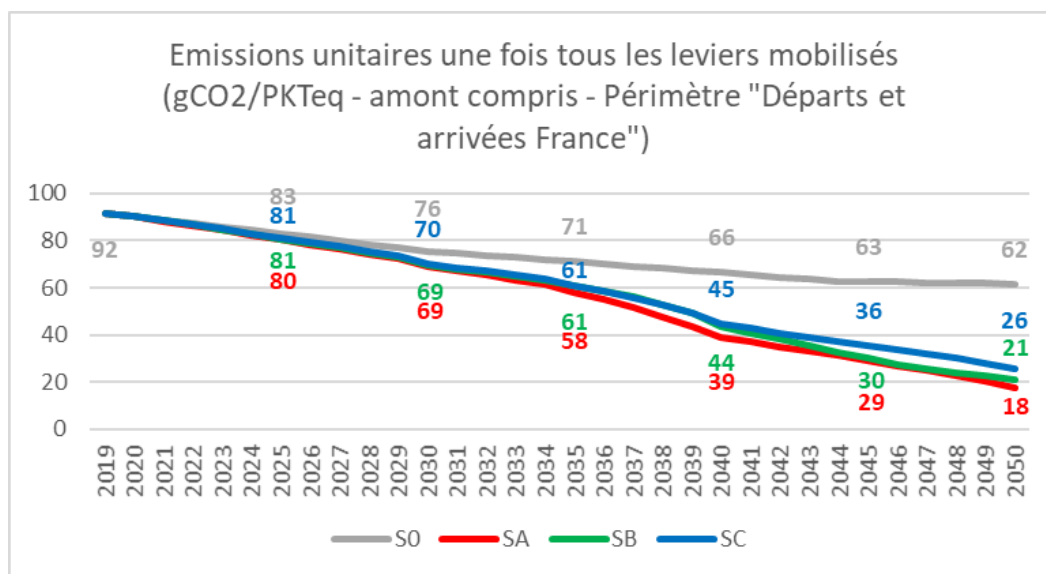


Figure 5 : Emissions unitaires une fois tous les leviers mobilisés (gCO₂/PKTeq - amont compris - Périmètre "Départs et arrivées France")

Les vols ne seront pas complètement décarbonés en 2050, et l'impact climatique des voyages allers-retours diminuera moins vite que celui des vols au départ de la France.

Les émissions unitaires ne seront pas nulles en 2050. Par conséquent, les vols continueront à émettre du CO₂ à cette date. 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.

En outre, l'impact climatique des vols à destination de la France diminuera moins vite que celui des vols au départ de ce pays, puisque les électrocarburants ne seront pas une solution de décarbonation avant 2050 pour les vols en provenance des Outre-mer, de l'Amérique du Nord, de l'Asie, de l'Afrique et de l'Océanie compte tenu des trajectoires de décarbonation des mix électriques présentées à date par ces pays. L'impact climatique réel des voyages (incluant l'aller et le retour en avion) diminuera donc moins vite que celui des seuls vols au départ de la France. Il est ainsi essentiel que celle-ci suive les émissions liées aux vols au départ et à l'arrivée de la France ainsi 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 en France.

La modération du trafic est le levier permettant les plus fortes réductions d'émissions à court terme.

La modération du trafic est le seul levier qui permet des baisses d'émissions significatives à court terme (Figure 6 ci-dessous, hors effets prix). Recourir à ce levier permet également de diminuer l'importance des investissements à réaliser dans le développement de nouveaux modèles d'avions, le renouvellement des

flottes et le développement des capacités nationales de production de CAD et d'hydrogène bas-carbone. En pratique, les effets prix liés aux innovations énergétiques et technologiques pourraient avoir également un impact à la baisse sur le trafic, dans tous les scénarios (Figure 7).

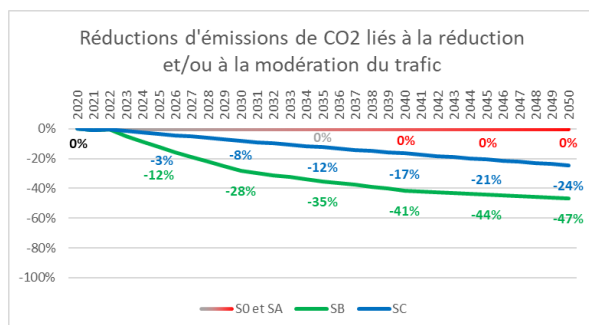


Figure 6 : Réductions d'émissions de CO₂ liées à la réduction et à la modulation du trafic par rapport au trafic de référence (hors effets prix)

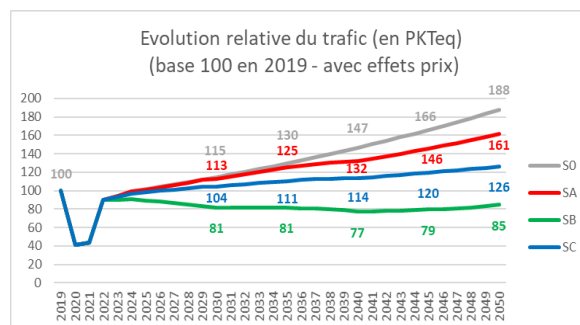


Figure 7 : Evolution relative du trafic (en PKTeq - base 100 en 2019 - avec effets prix)

Des études supplémentaires sont nécessaires pour développer les connaissances sur ce levier afin notamment de définir quelles mesures concrètes permettent de le mettre en œuvre et d'établir dans quelle mesure ce levier est pilotable, c'est-à-dire s'il peut être ajusté à la hausse ou à la baisse en fonction de la trajectoire souhaitée des émissions et des progrès technologiques effectivement déployés.

La mobilisation de tous les leviers de décarbonation permet de réduire de manière importante les émissions annuelles du secteur aérien entre 2019 et 2050

Dans le cadre du scénario de référence SO, c'est-à-dire sans action supplémentaire par rapport à celles déjà entreprises aujourd'hui, les émissions de CO₂ liées aux vols au départ de la France pourraient augmenter de +26% entre 2019 et 2050. Dans ce scénario, le secteur aérien ferait plus que quadrupler sa part dans les émissions totales françaises à l'horizon 2050, et représenterait de l'ordre de 23% des émissions du territoire.

Au contraire, les émissions annuelles diminuent significativement dans tous les scénarios de transition de 2019 à 2050 : entre 65% et 80% de réduction selon les scénarios (Figure 8). A noter que si les progrès d'efficacité énergétique des flottes et la modulation du trafic permettent de réduire la quantité d'énergie finale consommée entre 2019 et 2050, la quantité d'énergie primaire consommée augmente durant cette même période en raison de la mobilisation des CAD et de l'hydrogène bas-carbone.

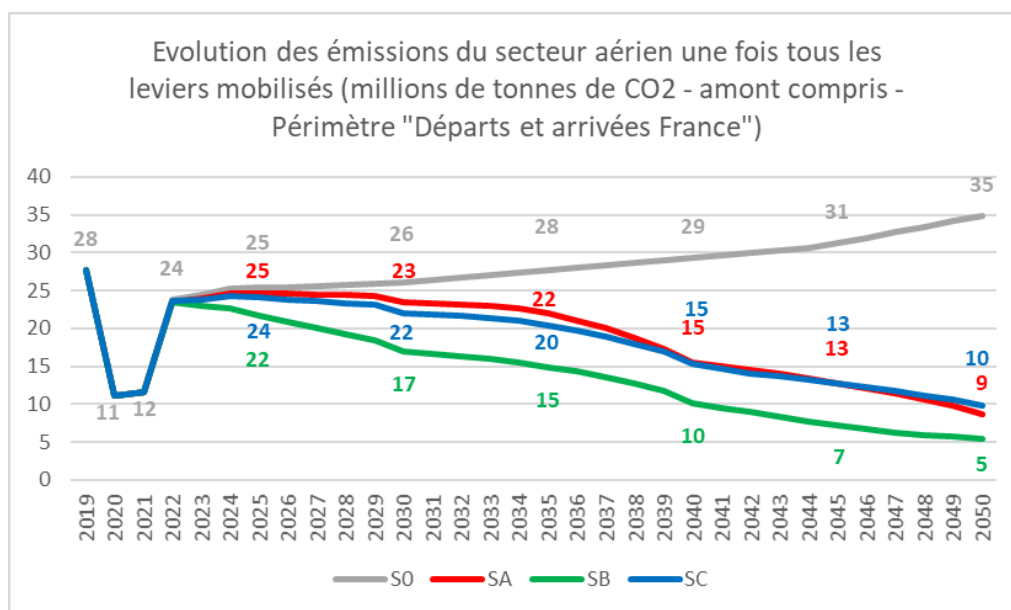


Figure 8 : Evolution des émissions annuelles de CO₂ du secteur aérien une fois tous les leviers mobilisés (millions de tonnes de CO₂ - amont compris - Périmètre "Départs et arrivées France")

Si les différents scénarios présentent des trajectoires relativement ambitieuses, seul le scénario B « Modération du trafic » permet une réduction effective des émissions annuelles du secteur à court terme (avant 2030) qui se prolonge sur les deux décennies suivantes. Ainsi, sur l'ensemble de la période 2020-2050, les émissions cumulées sont nettement inférieures aux autres scénarios (Figure 9) : environ 25% plus faibles qu'avec SA et SC (soit au moins 130 Mt de CO₂), et 50% plus faible que dans le scénario tendanciel.

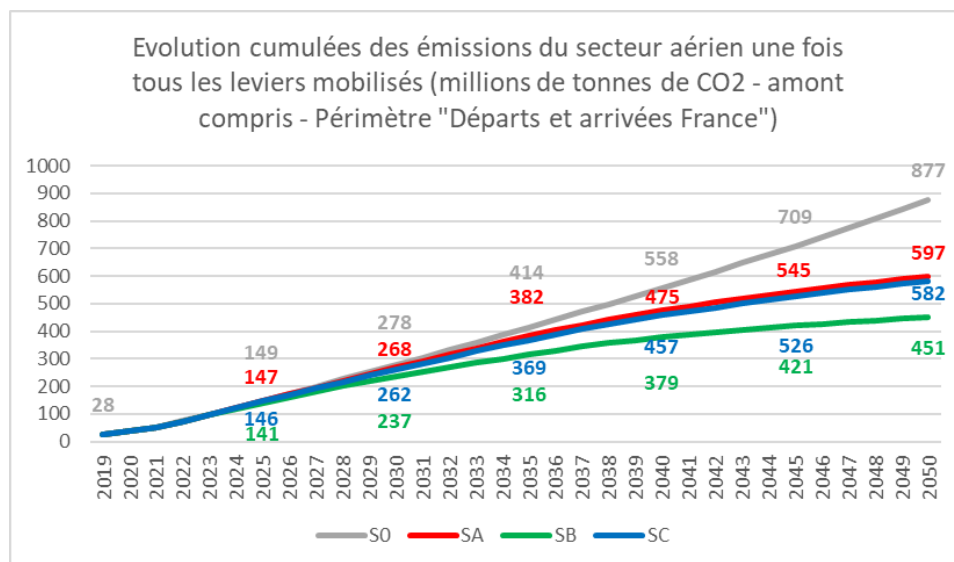


Figure 9 : Emissions cumulées de CO₂ du secteur aérien une fois tous les leviers mobilisés (hors amont - Périmètre "Départs et arrivées France")

4.2. Autres enjeux environnementaux

Au-delà de l'analyse quantitative réalisée sur le volet « énergie-climat », une analyse globale qualitative des externalités environnementales des différents scénarios a été réalisée à partir de l'état de l'art des connaissances disponibles et identifiées dans le cadre de la phase d'état des lieux.

En ce qui concerne la réduction des émissions de GES et des effets hors CO₂, les trois scénarios contribuent de manière significative à l'atténuation du changement climatique par rapport au scénario de référence S0. Néanmoins, et comme indiqué précédemment, le scénario B « Modération du trafic » présente une trajectoire mieux maîtrisée des émissions cumulées sur l'ensemble de la période 2020-2050. S'agissant de l'adaptation au changement climatique, qui n'est pas représentée ci-après, il existe a priori peu d'éléments discriminants entre les scénarios.

La pression sur les sols, la biodiversité et la consommation d'espaces naturels agricoles et forestiers est plus forte dans le scénario A « Rupture technologique » dans la mesure où ce scénario fait davantage appel à la ressource en biomasse et en électricité bas-carbone pour la production de carburants d'aviation durable. De manière plus générale, la hausse du trafic induite par ce scénario suppose des besoins accrus en termes d'infrastructures (aéroportuaires, production d'électrocarburants ...) qui auront des impacts potentiels sur ces enjeux environnementaux.

En ce qui concerne certains autres enjeux (pollution de l'air, bruit, et risques technologiques), ces risques doivent être correctement gérés par la filière pour permettre une acceptabilité locale des éventuels développements du trafic et/ou des nouvelles infrastructures.

De manière plus générale, le scénario B « Modération du trafic », qui est basé sur une réduction du trafic aérien à court terme et une croissance modérée du trafic à moyen et long terme, est celui qui permet de minimiser le plus certains impacts environnementaux du secteur aérien entre 2020 et 2050 (effets hors CO₂, pollution de l'air, nuisances sonores).

Le scénario B « Modération du trafic » a cependant un impact négatif sur les paysages, les sols et la biodiversité en raison des changements d'affectation des sols liés à la production de CAD (cultures spécifiques pour produire des biocarburants et/ou installations électriques pour produire des électrocarburants). Ce scénario 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.

La Figure 10 ci-dessous synthétise les résultats de l'analyse des impacts environnementaux des scénarios de transition. Ces impacts sont classés par enjeux (atténuer le changement climatique, biodiversité...) qui sont eux-mêmes hiérarchisés entre eux (majeur, important ou modéré). Les cases colorées permettent ainsi de visualiser l'impact des scénarios sur chacun des enjeux. Par exemple, le scénario B « Modération du trafic » est le scénario qui permet le plus de réduire les effets hors CO₂ du secteur aérien dans les trois scénarios de transition. Les trois scénarios de transition permettent néanmoins bien une réduction des effets hors CO₂ par rapport au scénario de référence S0.

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, traînées 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 10: Synthèse de l'analyse des autres impacts environnementaux des scénarios

5. ANALYSE DES EXTERNALITES SOCIO-ECONOMIQUES

Afin de remettre en perspective les résultats liés aux impacts environnementaux des scénarios, l'étude intègre une évaluation qualitative de leurs impacts socio-économiques ainsi que des investissements qui leur sont associés.

Le scénario de modération de trafic conduit à stabiliser l'activité économique du secteur

L'évolution du nombre d'emplois et de la valeur ajoutée du secteur aérien est directement liée à celle du chiffre d'affaires de la filière, qui est elle-même corrélée au niveau de trafic aérien. Par conséquent, le nombre d'emplois et la valeur ajoutée du secteur aérien en France augmentent significativement en 2050 dans les scénarios SA « Rupture technologique » et SC « Tous leviers », et ce en lien avec l'augmentation du trafic.

Le scénario B « Modération du trafic » conduit à une stabilisation du trafic aérien entre 2023 et 2050, et donc du nombre d'emplois liés aux vols et aux aéroports et de la valeur ajoutée du secteur aérien. Cette évaluation n'intègre pas le secteur de la construction aéronautique, dont l'activité dépendra essentiellement du volume d'avions exportés, et donc des efforts de modération de trafic consentis par les autres pays.

Des subventions publiques à destination du secteur aérien qui ne doivent pas conduire à une augmentation des émissions du secteur aérien

Dans l'hypothèse où les Etats voudraient 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, ils pourraient décider de subventionner le secteur aérien. Néanmoins, les montants des subventions à accorder au secteur pour atténuer les effets prix sont élevés. Ces montants deviennent significatifs à partir de 2030 lorsque les effets prix liés à l'utilisation des CAD deviennent importants, et augmentent, rapidement au cours du temps (en lien avec l'augmentation rapide de l'utilisation de CAD). Sur la période 2030-2050, leur montant cumulé pourrait être de l'ordre de plusieurs dizaines de milliards d'euros, et pourrait même atteindre 2 et 4 milliards d'euros par an à l'horizon 2050.

Subventionner le secteur aérien pour atténuer les effets prix pourrait potentiellement conduire à une hausse des émissions cumulées de CO₂ 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 émissions de GES de ses politiques de subvention à destination du 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. Il serait légitime que seuls les investissements en recherche et développement fassent l'objet de subventions publiques.

Des scénarios associés à des investissements publics conséquents

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. À titre d'exemple, 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. Ces aides publiques sont néanmoins assorties de conditions (notamment des investissements privés dans la recherche et le développement de technologies propres) et à des contreparties environnementales.

6. MESURES DE MISES EN ŒUVRE IDENTIFIÉES

Les trois scénarios de transition écologique du secteur aérien décrits dans le cadre de cette étude (SA « Rupture technologique », SB « Modération du trafic » et SC « Tous leviers ») ne pourront se faire sans la mise en œuvre de mesures concrètes et structurantes, permettant de donner une perspective claire à moyen terme afin de diminuer les impacts environnementaux 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'EU-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.

CONCLUSION

Cette étude a permis de construire et d'analyser plusieurs trajectoires possibles pour l'évolution du secteur aérien en France. Ces différents chemins possibles s'appuient sur une combinaison de leviers permettant au secteur d'anticiper les mesures structurantes et investissements nécessaires pour répondre aux enjeux climatiques et énergétiques en particulier.

Les trois scénarios élaborés dans le cadre de cette étude illustrent la complémentarité des leviers de réduction des émissions. La réduction et/ou la modération de la demande est le seul levier pouvant permettre des réductions rapides des émissions de GES à court terme et le plus bas niveau possible d'émissions cumulées sur la période 2020-2050. Il est nécessaire de statuer sur le niveau et les modalités concrètes du recours au levier de la maîtrise du trafic, qui est une forme de sobriété. A cette fin, des travaux spécifiques d'étude de faisabilité et d'évaluation des impacts socio-économiques puis d'expérimentation devraient être réalisés à la suite de la présente étude⁸.

En parallèle, il est nécessaire que les acteurs publics et privés investissent massivement dès à présent 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, d'hydrogène, et d'électricité bas-carbone, afin de garantir une capacité du secteur à maîtriser les émissions de GES à moyen et long terme. Ces investissements permettront de mobiliser ces deux leviers techniques majeurs de réduction des émissions unitaires de CO₂ et éventuellement de relâcher une éventuelle contrainte sur le trafic. La temporalité et l'intensité de la mobilisation de ces deux leviers dépendront de celles des investissements.

Enfin, l'intégration par la France des émissions de GES liées aux vols internationaux dans ses objectifs climatiques et dans le périmètre de la SNBC, pourrait être l'occasion de consolider sa vision des besoins en ressources en biomasse et en électricité bas-carbone à l'horizon 2050. Cette intégration lui permettrait de mieux planifier la production et la consommation de ces ressources ainsi que la transition écologique du secteur aérien. Une telle mesure permettra d'ouvrir la voie à l'élaboration de politiques publiques structurantes offrant une lisibilité claire à moyen terme aux acteurs du secteur, étape nécessaire afin de planifier l'évolution industrielle et professionnelle de ce secteur.

⁸ Sur ce sujet, le Haut Conseil pour le Climat, dans son rapport annuel 2022 (« Dépasser les constats, mettre en œuvre les solutions »), va plus loin et recommande de passer à l'action dès maintenant : « Le secteur aérien doit engager sa décarbonation par la maîtrise de la demande. », « 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 ».

Figures

Figure 1 : Evolution relative des émissions directes de GES du secteur aérien et des émissions totales françaises hors secteur des terres par rapport à 2019 (Périmètre « Départs France » - Base 100 en 1990).....	11
Figure 2 : Répartition des émissions de CO ₂ des vols commerciaux vers et depuis la France en 2019.....	12
Figure 3 : Evolution relative du trafic suite à la modération du trafic (en PKTeq - base 100 en 2019 - sans effets prix)	16
Figure 4 : Récits détaillés associés à chacun des scénarios.....	19
Figure 5 : Emissions unitaires une fois tous les leviers mobilisés (gCO ₂ /PKTeq - amont compris - Périmètre "Départs et arrivées France").....	20
Figure 6 : Réductions d'émissions de CO ₂ liés à la réduction et à la modération du trafic par rapport au trafic de référence (hors effets prix)	21
Figure 7 : Evolution relative du trafic (en PKTeq - base 100 en 2019 - avec effets prix)	21
Figure 8 : Evolution des émissions annuelles de CO ₂ du secteur aérien une fois tous les leviers mobilisés (millions de tonnes de CO ₂ - amont compris - Périmètre "Départs et arrivées France")	21
Figure 9 : Emissions cumulées de CO ₂ du secteur aérien une fois tous les leviers mobilisés (hors amont - Périmètre "Départs et arrivées France")	22
Figure 10 : Synthèse de l'analyse des autres impacts environnementaux des scénarios	24

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 CO₂, 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 CO₂ 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.

