

# Pouvoir voler en 2050

QUELLE AVIATION DANS  
UN MONDE CONTRAINT ?

---

03 MARS 2021



Avec la contribution de :



## Édito

Peu de secteurs occupent dans le paysage de la transition énergétique une place aussi singulière que l'aviation. Industrie de pointe à l'impact climatique négligeable pour ses défenseurs, lubie des ultra-riches rompus à l'exercice de minimiser leurs émissions pour ses détracteurs, elle génère des avis clivants et des oppositions parfois stériles.

Les auteurs du présent rapport soutiennent l'idée que par-delà ces positions extrêmes, une autre voix doit se faire entendre.

En mai 2020 un premier rapport intitulé Crise(s), climat : préparer l'avenir de l'aviation proposait une série de mesures décarbonantes que l'État pourrait exiger en contrepartie de son soutien au secteur. En ciblant des actions activables immédiatement et aux effets significatifs dès 2025, ce rapport défendait l'idée que le redressement d'un secteur durement touché par la crise n'était pas incompatible avec le lancement d'une politique effective de décarbonation. Bien au contraire : il soutenait que temporiser la transition énergétique de l'aviation la rend d'autant plus vulnérable face à la menace climatique.

Les neuf mois qui nous séparent de cette publication ont été jalonnés d'événements contrastés. Si Airbus s'est engagé dans la production d'un avion à hydrogène en 2035, si les prises de positions publiques sur la décarbonation de l'aviation se sont multipliées, la crise sanitaire s'est prolongée, affectant l'équilibre financier de nombreux acteurs aujourd'hui confrontés à un risque de faillites sans précédent. Mais ces neuf mois ont aussi vu de nombreuses voix s'élever, celles d'ingénieurs, de pilotes, de contrôleurs aériens, d'employés de compagnies aériennes et de simples usagers de l'aviation qui se sont reconnus dans le discours du rapport du Shift Project. Exprimer leur intérêt pour la démarche, en souligner les manques et les limites, a conduit un grand nombre d'entre eux à souhaiter poursuivre l'analyse.

Telles sont donc les contributrices et contributeurs de ce nouveau rapport : des professionnels du secteur désireux de se confronter à l'angoissante mais inéluctable question de savoir comment agir aujourd'hui pour continuer à voler demain, dans un monde contraint. Si personne ne mésestime les souffrances et le désarroi causés par la crise du COVID-19, bien plus lourdes sont les menaces que laissent augurer le changement climatique, l'épuisement des énergies fossiles et l'effondrement de la biodiversité sur la vie humaine en général, et sur l'aviation en particulier.

Nous qui aimons l'aviation et qui pour beaucoup en ont fait leur métier, nous qui aimons la technique, les grandes découvertes, toute cette prodigieuse intelligence humaine mobilisée pour faire voler des machines, nous affirmons aimer plus encore la vie, la nature et la science - cette science qui décrit aussi rigoureusement les phénomènes aérodynamiques et climatiques, cette science dont on ne peut à la fois jouir des bienfaits et ignorer les bouleversements qu'elle projette.

Nous, ingénieurs aéronautique, pilotes, contrôleurs aériens, employés de compagnies aériennes, usagers ou simples amoureux de l'aviation, las des discours clivants à son égard, signons ce rapport avec l'ambition de créer les conditions d'un débat apaisé sur sa capacité à réduire drastiquement ses émissions de gaz à effet de serre, dans des proportions compatibles avec un monde vivable en 2100. Nous, aérophiles climato-concernés, revendiquons pouvoir faire partie de la solution plutôt que du problème, en portant une parole transparente, désintéressée et scientifiquement étayée sur ce que peut faire - mais aussi ne peut faire - le secteur aérien pour se décarboner.

**Le Comité de rédaction**

# Lire le communiqué de presse



## Comité de rédaction

### Equipe de rédaction

**N.B.** La situation professionnelle de certains membres de l'équipe les contraint à l'anonymat. Par ailleurs, chacun des contributeurs s'exprime ici en son nom propre et ses propos ne reflètent en aucun cas ceux de son entreprise ou association, exceptions faites de The Shift Project, les Shifters, Citoyens pour le Climat et SUPAERO-DECARBO. Ces derniers portent une parole indépendante de l'Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace (ISAE-SUPAERO) qui ne l'engage en rien.

Ange **BLANCHARD** (Etudiant ISAE-SUPAERO), Jeanne **BOSCHIERNE** (Etudiante ISAE-SUPAERO), Angela **BOVO** (Ingénieure SUPAERO, Membre du collectif SUPAERO-DECARBO), François **CAMILLERI**, (Ingénieur aéronautique, Membre du Pôle Sciences du collectif Citoyens Pour Le Climat), Grégoire **CARPENTIER** (Ingénieur SUPAERO, Co-fondateur du collectif SUPAERO-DECARBO), Olivier **COEURDRAY** (Ingénieur SUPAERO, Membre du collectif SUPAERO-DECARBO), Maximilien de **POMMEROL** (Etudiant ISAE-SUPAERO), Olivier **DEL BUCCHIA** (Ingénieur SUPAERO, Co-fondateur du collectif SUPAERO-DECARBO), Xavier **DEVARS** (Pilote de Ligne), Soizic **ESNAULT** (Doctorante en mécanique des fluides), Louis **FIEVET** (Ex-ingénieur aéronautique, Membre du collectif SUPAERO-DECARBO), Yohann **GIRARDEAU** (Etudiant ISAE-SUPAERO), Bich **HA DUONG** (Ingénieur SUPAERO, 16 ans de carrière dans une compagnie aérienne, Membre du collectif SUPAERO-DECARBO), Nicolas **HUBERT** (Ingénieur aéronautique, Membre du collectif SUPAERO-DECARBO), Clément **JARROSSAY** (Ingénieur aéronautique), Auriane **JOUDIOU** (Etudiante ISAE-SUPAERO & Sciences-Po Paris), Alix **LAGET** (Contrôleuse aérienne), Julien **MARCINKOWSKI** (Ingénieur aéronautique, Formateur énergie-climat), Florian **NGUYEN** (Ingénieur aéronautique et spatial), Florent **NOBELEN** (Ingénieur aéronautique, Membre du collectif

SUPAERO-DECARBO), Marie **REBIERE** (Etudiante ISAE-SUPAERO), Jules **RICHARD** (Ingénieur aéronautique, conseiller en mobilité, Membre du collectif SUPAERO-DECARBO), François **ROBERT** (Ingénieur aéronautique, Etudiant en Arts et Politiques à Sciences Po, Membre du collectif SUPAERO-DECARBO), Elisabeth **WOELDGEN** (Ingénieure aéronautique).

**Ont souhaité garder l'anonymat : Guillaume (Pilote de ligne), 6 ingénieurs aéronautique, 1 ex-administrateur d'une compagnie aérienne.**

### Relecture / Conseil

Loïc **BONIFACIO** (Ingénieur ESTACA), Sigrid **CLAVIERAS** (Ingénieure SUPAERO, Union des transports publics et ferroviaires, Membre du collectif SUPAERO-DECARBO), Maxime **EFOUI-HESS** (Ingénieur SUPAERO, Membre du collectif SUPAERO-DECARBO, Chargé de projet, THE SHIFT PROJECT), Yves **FOUQUART** (Ancien professeur de l'Université de Lille, Ex-membre du comité scientifique du Programme mondial de Recherches sur le Climat et co-rédacteur du 3ème rapport du GIEC), Nicolas **GOURDAIN** (Professeur à l'ISAE-SUPAERO, Membre du collectif SUPAERO-DECARBO), François **NEGRE** (Contrôleur aérien, Expert ATM pour les études européennes), Nicolas **RAILLARD** (Chef de projet THE SHIFT PROJECT), Yannick **SALEMAN** (Chef de projet emploi, finance, macroéconomie, THE SHIFT PROJECT), Antoine **THEBAULT**, Léa **FOURCADE** (Graphiste), Édouard **LAFORE** (Infographiste).

**Ont souhaité garder l'anonymat : Un ingénieur aéronautique, un membre de la DGAC, un membre de l'OACI, une personne en poste dans les solutions IT pour les compagnies aériennes et le secteur du Voyage, Manager en Stratégie**

## Table des matières

|   |                                                                                                |   |
|---|------------------------------------------------------------------------------------------------|---|
| 1 | Contexte                                                                                       | 4 |
| 2 | Objectifs clés du rapport                                                                      | 4 |
| 3 | Notre proposition de base : l'instauration d'un budget carbone pour le transport aérien        | 5 |
| 4 | Nos 2 scénarios de décarbonation                                                               | 5 |
| 5 | Focus sur la France : quelles mesures de décarbonation activer rapidement au niveau national ? | 7 |
| 6 | Impacts sur les emplois en France                                                              | 8 |
| 7 | Conclusion                                                                                     | 9 |

# Pouvoir voler en 2050

QUELLE AVIATION DANS  
UN MONDE CONTRAINT ?

**SYNTHÈSE**

03 MARS 2021



Avec la contribution de :



## 1 Contexte

Le secteur aérien est aujourd'hui frappé par la pire crise de son histoire, affectant tous les acteurs du secteur avec des risques de faillites en cascade, de pertes d'emplois, et de savoir-faire uniques<sup>1</sup>. A plus long terme, **les risques climatiques, couplés avec l'épuisement des ressources fossiles, menacent l'ensemble de l'économie mondiale**. Plus que jamais, anticiper et se transformer devient, pour l'aviation comme pour tout autre secteur économique, un enjeu de survie dans le monde bas carbone de demain.

**En 2018, l'aviation civile mondiale a émis  $\sim 1,1$  GtCO<sub>2</sub><sup>2</sup>, amont compris, soit  $\sim 2,56\%$  des émissions mondiales de CO<sub>2</sub> (agriculture, foresterie et autre utilisation des terres inclus)<sup>3</sup>. Malgré l'amélioration continue de l'efficacité énergétique des aéronefs, les émissions de CO<sub>2</sub> ont augmenté de 42% entre 2005 et 2019<sup>4</sup> du seul fait de la croissance du trafic aérien.** Avec les perspectives de croissance post crise COVID annoncées par l'IATA<sup>5</sup>, la maîtrise de ces niveaux d'émissions est une préoccupation de premier ordre.

Le transport aérien contribue également au dérèglement climatique par le rejet d'autres GES. **En 2011, l'aviation contribuait ainsi – en comptabilisant les effets hors CO<sub>2</sub> – à hauteur de 3,5% au forçage radiatif effectif net ; en 2018, la part des effets hors CO<sub>2</sub> au forçage radiatif est deux fois supérieure à celle du CO<sub>2</sub> seul<sup>6</sup>.** Toutefois, il n'existe pas encore de consensus sur une métrique robuste pour décrire les impacts climatiques de ces effets, dont la dynamique et la temporalité sont significativement différentes. Nous présentons l'état des connaissances scientifiques sur les phénomènes hors CO<sub>2</sub><sup>7</sup>, mais dans un objectif de robustesse des calculs et de projec-

tion sur le long terme, les études quantitatives se concentrent sur les seules émissions de CO<sub>2</sub>. L'impact climatique évalué doit donc être considéré comme minimum. Il est bien rappelé que toute technologie ou stratégie de réduction des émissions de l'aérien doit intégrer l'ensemble de ces phénomènes.

Rappelons qu'en dépit de ses efforts de démocratisation, le transport aérien reste l'apanage d'une minorité de personnes, parmi les plus aisées. **Seule 10% de la population mondiale prend l'avion chaque année<sup>8</sup> et, en 2018, 1% de la population mondiale était responsable de 50 % des émissions de l'aviation<sup>9</sup>.** Ramenés au nombre de voyageurs uniques, ces niveaux d'émission prennent une toute autre dimension.

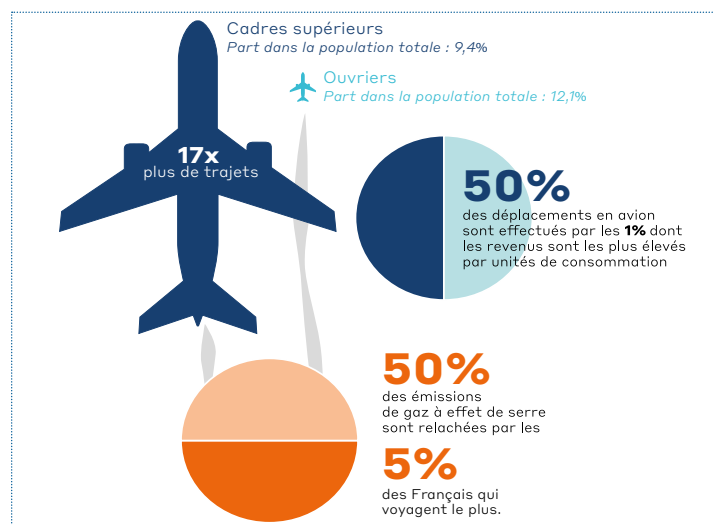


Figure 1 : Une sur-représentation des CSP+ dans les avions

## 2 Objectifs clés du rapport

1. Proposer la **définition et l'instauration d'un budget carbone** pour le transport aérien
2. Chiffrer les mesures de décarbonation proposées par le secteur via une **analyse par scénario**
3. **Soumettre nos deux scénarios de décarbonation** à l'épreuve du budget carbone, afin d'en tirer des conclusions
4. Lister les mesures de décarbonation activables rapidement au niveau national

**Nous avons adopté une approche holistique qui couvre les prérequis technologiques, énergétiques, et organisationnels ainsi que les impacts sur les usages, les emplois et les infrastructures.** Les aspects relatifs à la consommation de ressources non énergétiques et au financement de la transition sont bien identifiés mais leur quantification fera l'objet d'une étude ultérieure (voir rapport complet). La Note méthodologique qui accompagne la présente étude sera publiée au printemps 2021.

1. Voir rapport complet §5.8 et annexe 3

2. Quantité de CO<sub>2</sub> seul en 2018 (sans prise en compte des autres gaz à effet de serre) de 905 MtCO<sub>2</sub> (hors amont) tirée du tableau « June 2020 » in IATA, Airline Industry Economic Performance – June 2020 – Data Tables. D'autres sources fournissent des valeurs différentes mais du même ordre de grandeur, ce qui suffit pour notre étude ici : 918 Mt selon l'ICCT, 905 Mt selon l'EESI, ou 918 Mt selon l'OACI.

3. 42,1 GtCO<sub>2</sub> émis en 2018 au niveau mondial selon Global Carbon Project [https://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget/archive/2019/GCP\\_CarbonBudget\\_2019.pdf](https://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget/archive/2019/GCP_CarbonBudget_2019.pdf)

4. Voir Note de calcul, source ATAG pour 2005 et IATA pour 2019

5. <https://www.iata.org/contentassets/e938e150c-0f547449c1093239597cc18/pax-forecast-infographic-2020-final.pdf>

6. The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018, par Lee et al., Atmospheric Environment, 2020, 117834, ISSN 1352-2310, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117834> (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231020305689>)

7. Voir rapport complet §5.7

8. Le Monde [https://www.lemonde.fr/idees/article/2011/11/01/7-milliards-en-avion\\_1596821\\_3232.html](https://www.lemonde.fr/idees/article/2011/11/01/7-milliards-en-avion_1596821_3232.html)

9. The Guardian, 1% of people cause half of global aviation emissions – study, 2020.

### 3 Notre proposition de base : l'instauration d'un budget carbone pour le transport aérien

« **Limiter l'élévation de la température à +2°C par rapport aux niveaux préindustriels avec une probabilité de 67%** » est un objectif climatique conforme à l'Accord de Paris et communément pris en référence dans les publications scientifiques. **Face à cet objectif, le GIEC évalue un budget carbone mondial de 1 170 GtCO<sub>2</sub><sup>10</sup> ramené à 844 GtCO<sub>2</sub> pour la période 2018 - 2050.**

Si le secteur aérien s'est fixé l'objectif ambitieux de réduire de 50% en 2050 par rapport à 2005<sup>11</sup>, il n'a pas pour autant défini de budget carbone. D'autre part, les comptabilités carbone nationales excluent le transport international, dont l'aérien. Il n'est donc pas possible de garantir la compatibilité des différentes trajectoires envisagées par le secteur avec l'objectif climatique formulé par le GIEC.

C'est sur la base de ce constat qu'est formulée la proposition cadre de l'étude, consistant essentiellement à **définir un budget carbone et une trajectoire de réduction des GES pour le transport aérien, national et international, tenant compte de la totalité de l'impact climatique du transport aérien, hors effet hors CO<sub>2</sub>.**

Ainsi, **nous avons défini un budget carbone pour l'aviation internationale**, c'est-à-dire la quantité totale de GES que le

secteur peut émettre d'ici 2050 pour rester dans l'objectif de contenir le réchauffement climatique à 2°C d'ici 2100.

Le budget carbone de l'aviation internationale pourrait être défini par l'OACI et décliné dans la SNBC<sup>12</sup> et dans la prochaine révision des Contributions au niveau national (CDN)<sup>13</sup>.

Dans cette étude, le budget carbone de l'aérien est défini **au prorata des émissions du secteur en 2018, soit respectivement 536 MtCO<sub>2</sub> au niveau mondial et 21,6 MtCO<sub>2</sub> au niveau français<sup>14</sup>, sur la période 2018-2050.**

Dans cette étude, **les budgets carbone\*** de l'aérien sont définis **au prorata des émissions du secteur en 2018**, soit respectivement :



**536 MtCO<sub>2</sub>**  
au niveau mondial

**21,6 MtCO<sub>2</sub>**  
au niveau français.



\* sur la période 2018-2050.

### 4 Nos 2 scénarios de décarbonation

En partant de cette proposition de base, nous avons étudié deux trajectoires possibles de réduction des impacts climatiques du transport aérien compatibles avec les objectifs de l'Accord de Paris.

Pour cela, nous avons établi **deux scénarios de décarbonation par la technologie du secteur aérien**, nommés « **MAVERICK** » et « **ICEMAN** »<sup>15</sup>.

Le scénario « **MAVERICK** » prend des hypothèses très optimistes sur le potentiel de décarbonation par la technologie, mais qui suppose des choix largement favorables au secteur aérien, des investissements importants et immédiats, et qui présente un haut niveau de risque sur sa mise en œuvre dans des délais courts.

• Dans ce scénario, la **flotte mondiale se renouvelle en 15 ans** (contre une moyenne actuelle de 25 ans estimée d'après les données de l'OACI<sup>16</sup>), la **production de carburants alternatifs est maximale** (au-delà de toutes les projections actuelles)<sup>15</sup> et **elle est destinée en priorité au transport aérien.**

Le scénario « **ICEMAN** » prend des hypothèses raisonnablement optimistes sur le potentiel de décarbonation par la technologie,

plus étalé dans le temps et qui présente donc plus de marges pour sa mise en œuvre.

• Dans ce scénario, le scénario précédent est **décalé de 5 ans, la flotte se renouvelle en 25 ans** et le transport aérien n'accède qu'à **50% de la production mondiale de carburants alternatifs.**

Nous partons de l'hypothèse que le trafic retrouve son niveau de 2019 en 2024, et qu'il croît ensuite de 4% par an jusqu'en 2050 (projection 2019-2039, IATA).

Les scénarios sont résumés dans le tableau ci-dessous :

10. Voir rapport complet §4.2.3, sourcé du GIEC SR15, chapitre 2

11. Cible ATAG présentée dans le rapport « 2019 Environmental Report » de l'OACI (p174)

12. SNBC: <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/strategie-nationale-bas-carbone-snb>

13. Voir détail de la proposition 0 dans le rapport complet au §6

14. Voir rapport complet §5.9.3

15. Voir rapport complet §8.1

16. [https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/ICAO-ENV-Report2019-F1-WEB%20\(1\).pdf](https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/ICAO-ENV-Report2019-F1-WEB%20(1).pdf) p.279

|                                                                                                  | MAVERICK                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | ICEMAN                                                                                                       |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Gains en efficacité énergétique et sur les opérations au sol et en vol                           | Le gain en efficacité énergétique est une hypothèse raisonnable                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                              |
| Roadmap industrielle d'arrivée sur le marché de nouveaux avions                                  | Roadmap agressive, détaillée par type d'avion, incluant : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Gains technologiques optimistes</li> <li>• Entrée en service de courts et/moyens courriers à hydrogène en 2035</li> <li>• Entrée en service d'un long-courrier pouvant voler avec 100% de carburants alternatifs en 2035</li> </ul> | Décalage de 5 ans par rapport à Maverick.                                                                    |
| Cadence de renouvellement des flottes                                                            | Tous les 15 ans                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Tous les 25 ans                                                                                              |
| Priorité des carburants alternatifs pour l'aérien (production abondante pour les deux scénarios) | 100% de la production de carburants alternatifs dédiée à l'aviation                                                                                                                                                                                                                                                                    | 50% de la production de carburants alternatifs dédiée à l'aviation                                           |
|                                                                                                  |  Hypothèse raisonnable                                                                                                                                                                                                                                 |  Hypothèse optimiste        |
|                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |  Hypothèse très optimiste |

## Conclusions

Nous avons soumis ces deux scénarios à l'épreuve du budget carbone précédemment établi.

Si les deux scénarios « MAVERICK » et « ICEMAN » permettent d'infléchir significativement la courbe des émissions, **aucun des deux n'est compatible avec le budget carbone dans cette hypothèse d'une croissance de trafic de 4% par an**. Au-delà des incertitudes qui pèsent sur la réalisation des objectifs technologiques du secteur, la vitesse de diffusion des innovations dans la flotte est trop faible au regard de l'urgence climatique.

En résumé, nos travaux montrent **qu'aucune trajectoire réaliste ne peut conduire à l'objectif sans réduire la croissance du trafic**.

## Tenir le budget carbone

Pour rester dans l'enveloppe du budget carbone **définie plus haut**, il reste théoriquement trois options :

- **Parier sur encore plus d'amélioration technique et plus vite que dans le scénario « MAVERICK »** : c'est un pari très risqué, ce scénario étant déjà une limite très haute de ce que l'on peut attendre du progrès technique et engendrant déjà des externalités énergétiques considérables.

- **Rehausser le budget carbone du secteur aérien** : cela nécessite d'abord de définir un tel budget au niveau international, de le piloter et d'effectuer des arbitrages intersectoriels forts au détriment d'autres secteurs, le budget total n'étant pas négociable puisque déterminé physiquement. Cependant, il n'existe pas à ce jour de gouvernance internationale pour le faire. De plus, le secteur aérien est déjà largement en compétition avec d'autres secteurs pour l'accès aux ressources bas carbone et au financement de ses programmes de développement.

- **Revoir l'hypothèse de trafic à la baisse** : il est essentiel d'intégrer cet élément dans les trajectoires de décarbonation afin d'établir une politique de sobriété pertinente et d'anticiper les conséquences sur l'emploi du secteur aérien.

**Ainsi, pour rester dans l'enveloppe du budget carbone définie plus haut, nous devons abaisser le taux de croissance à partir de 2025 à +2,52% dans le scénario « MAVERICK », et à -0,8% dans le scénario « ICEMAN »**. Si ces niveaux de modération n'étaient pas effectifs en 2025 et que le trafic continuait sa progression de 4% par an, l'effort à fournir ultérieurement serait fatalement plus important. La Figure 2 montre l'évolution de l'effort de sobriété à fournir pour rester dans le budget carbone, selon l'année où le trafic n'augmenterait plus de 4% par an, que ce soit « spontanément » ou à la suite d'un consensus international sur la modération de la croissance.

La situation nécessite à la fois des choix tactiques pour maîtriser les émissions à court terme au sein du budget carbone, et des choix stratégiques pour pérenniser le niveau d'émission du secteur aérien post 2050.

**À budget carbone constant, plus nous tardons, plus les conséquences sur le trafic – donc sur la santé du secteur aérien – seront importantes.**

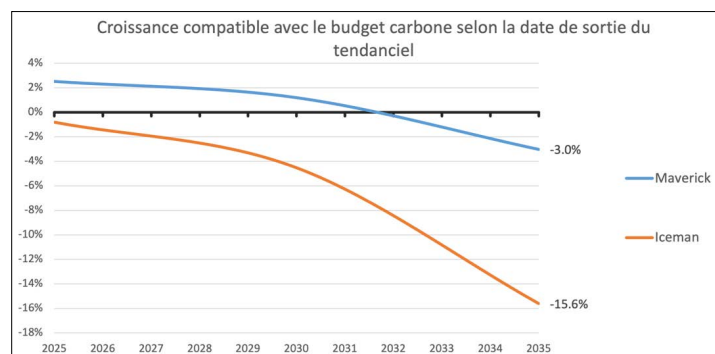


Figure 2 – Évolution de la croissance de trafic compatible avec le budget carbone en fonction de l'année où la trajectoire décroche du tendanciel

## 5 Focus sur la France : quelles mesures de décarbonation activer rapidement au niveau national ?

Les scénarios « MAVERICK » et « ICEMAN » ont été déclinés au niveau France.

Ramenés au périmètre des émissions France, celui mesuré par le DGAC<sup>17</sup>, les hypothèses des scénarios « MAVERICK » et « ICEMAN » diffèrent du périmètre Monde sur trois points structurants : la production de biocarburant, la répartition des émissions long-courriers VS court et moyen-courriers<sup>18</sup> et les actions possibles à court terme, présentées ci-après.

### A. Engager des mesures d'efficacité opérationnelle à court terme

Quatre axes de réductions des émissions, déployables à horizon 2025, ont été étudiés : **décarboner les opérations au sol, remplacer les appareils à turboréacteurs de petite capacité par des turbopropulseurs (à hélice), limiter le fuel tankering, réduire le cost index des vols au minimum.**<sup>19 20</sup>

**Mais leur impact est limité.** A horizon 2050, ils ne contribuent qu'à 4% de l'effort de réduction nécessaire<sup>21</sup>. Comme l'a montré l'étude du scénario mondial, un budget carbone fixé impose de trouver d'autres mesures de réduction à court terme.

**Ainsi, pour tenir dans l'enveloppe du budget carbone pré-défini, une sobriété dans les usages s'impose.**

### B. Engager des mesures de sobriété à court terme

La réduction du trafic aérien peut être subie, comme c'est le cas actuellement, ou **anticipée dans une dynamique permettant au transport aérien de se maintenir sur le long terme en maîtrisant ses émissions de GES.** La sobriété des usages peut venir d'une réduction de l'offre ou de la demande.

Dès lors, **comment adapter l'offre de l'aérien pour inciter à la sobriété et à la complémentarité avec des modes de transport moins émissifs ?**

Quatre axes d'adaptation de l'offre de transport, déployables à court terme, sont étudiés : **densifier les cabines, supprimer l'offre aérienne lorsqu'une alternative ferroviaire de moins de 4h30 existe, limiter le trafic de l'aviation d'affaire, repenser le système de "miles"**<sup>22 23</sup>.

La mise en œuvre de telles propositions pose la question des **usages du transport aérien, du business model et du positionnement marketing des compagnies aériennes historiques.** Là encore, il est primordial que **la législation accompagnant ces mesures ne défavorise pas les acteurs nationaux** au profit de leurs concurrents. Si ces mesures sont activables rapidement, car indépendantes d'un saut technologique ou d'un programme industriel, elles doivent s'inscrire dans une politique transnationale de long terme.

Ces mesures ont un effet significatif sur la courbe des émissions cumulées (-10%) car elles sont appliquées à très court terme (entre 2021 et 2025). Ainsi associées aux mesures techniques, elles permettraient de repousser d'environ un an la date de consommation du budget carbone.

**Mais dans tous les cas, le niveau de sobriété apporté par ces mesures ne permet toujours pas de rester dans le budget.**

### C. Aller plus loin dans la sobriété

**Pour rester dans le budget carbone France, le taux de croissance à partir de 2025 ne doit pas dépasser +0,71% dans le scénario « MAVERICK », et -1,75% dans le scénario « ICEMAN »**<sup>23</sup>. Cette option n'a rien de facile. Elle sera d'autant plus douloureuse que l'anticipation sera faible (cf. Figure 5 dans le scénario monde, rapport long) et devra idéalement s'accorder avec des choix de société quant à la place et au rôle que nous souhaitons pour le transport aérien.

Quatre axes de réflexions ont été identifiés et semblent actionnables dès à présent, sur l'ensemble du périmètre du transport longue distance, incluant l'aérien<sup>24</sup> :

- **Informier et sensibiliser** les parties prenantes et le grand public, notamment en développant les **ressources pédagogiques sur les enjeux climatiques** du secteur, en réglementant le **mode de calcul des effets hors CO<sub>2</sub>**, en développant un **calculateur officiel de l'empreinte carbone d'un voyage** pour tout type de moyen de transport ou encore en renforçant par voie réglementaire les **obligations d'affichage par les prestataires de transports de la quantité de gaz à effet de serre émise** pour tous les trajets.

17. DGAC, Bilan des émissions gazeuses 2019 : [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)

18. Voir analyse des écarts dans le rapport complet au §8.2.3

19. Voir rapport complet §7.2.1

20. Les axes d'études nationaux ont été repris du rapport du Shift Project « CRISE(S), CLIMAT : PRÉPARER L'AVENIR DE L'AVIATION » paru le 27/05/2020 <https://theshiftproject.org/article/climat-preparer-avenir-aviation-propositions-shift-contreparties/>

21. Voir rapport complet §7.2.1.5

22. Voir rapport complet §7.3

23. Voir rapport complet §7.4.1

24. Voir rapport complet §7.4

- **Inciter les voyageurs** à réduire leur nombre de déplacements, dans un premier temps pour motifs professionnels, par exemple **via des mécanismes d'allègement fiscaux, ou de subventions à la mise en place d'outils de collaboration à distance ou d'environnements de coworking** dans les zones de moyenne et faible densité.

- **Impliquer les usagers de l'avion dans la priorisation des usages**, en étendant par exemple à la mobilité longue distance les propositions D1 et D3 de la Convention Citoyenne pour le Climat <sup>25</sup>, mais aussi **en créant un collectif citoyen des usagers du transport aérien** chargé de s'assurer que les politiques de sobriété soient réellement en ligne avec les attentes des citoyens. On privilégiera les dispositifs permettant aux désignés de recevoir une formation suffisante, comme c'est le cas par exemple des conférences de citoyens.

- **Réglementer l'usage**, que ce soit par la **limitation de l'activité** (limitation des créneaux aéroportuaires, encadrement des subventions, moratoires sur la construction de nouvelles infrastructures), par **restriction de la demande** (modification du signal-prix, allocation de droits à voyager) ou encore via la **fiscalité**. Le chantier des taxes, particulièrement impopulaire, est fréquemment débattu sur le terrain de la justice sociale. Dans une perspective de juste répartition des efforts et d'équité d'accès au transport longue distance, une **taxe progressive indexée sur la fréquence des voyages et la distance parcourue** constitue une piste intéressante.

Ces dernières mesures doivent être **réfléchies à grande échelle, a minima au sein de l'Union Européenne, sur le périmètre global du transport longue distance**, afin de s'assurer de la réduction des émissions globales du secteur et d'un traitement équitable entre compagnies relevant de législations différentes.

## 6 Impacts sur les emplois en France

Le secteur aérien compte pour **3,5% du PIB mondial** avec plus de **60 millions d'emplois directs et indirects**. En France, l'aviation civile représente **4,3 % du PIB** (chiffre 2018), dont plus de la moitié pour la construction aéronautique.

L'activité de transport aérien en France regroupe environ **200 transporteurs aériens** et totalise **85 000 emplois directs** dont 60% en Ile-de-France. Du côté de l'industrie, l'aéronautique française affiche un solde positif à l'export de **31 milliards d'euros pour environ 350 000 emplois directs et indirects**.

Rester dans l'enveloppe du budget carbone Monde impose d'**ajuster le taux de croissance du trafic**, et ce quel que soit le scénario industriel : croissance annuelle de **+2,52% pour le scénario « MAVERICK »** et **-0,8% pour « ICEMAN »**. Toutes

ces projections sont conditionnées par une croissance du trafic modérée dès 2025, que ce soit de manière décidée (via un consensus international) ou subie (par exemple en conséquence du COVID-19). **Différer cette modération, en laissant le trafic repartir sur la tendancielle après 2024, permet à court terme d'éviter de nouvelles réductions d'effectifs, mais condamne d'autant plus l'emploi à long terme.**

Le scénario « **ICEMAN** », évidemment loin d'être souhaitable, reste néanmoins l'éventualité la plus probable dans notre cadre d'analyse. Sous réserve d'une modération de la croissance effective dès 2025, **le trafic mondial projeté en 2050 est réduit de 19% par rapport à 2019, et la production d'avions de 55%**. Comment en anticiper au mieux les conséquences ?

### La situation de l'emploi dans le secteur aérien dans le monde et en France

**4,3** milliards de passagers



Le secteur aérien représente **3,5%** du PIB mondial

soit **60 millions** d'emplois directs et indirects.

Le secteur aérien représente **4,3%** du PIB français

soit **435 000** emplois directs et indirects.

Répartis entre **200** transporteurs aériens et **120** aéroports.

**172** millions de passagers



25. <https://propositions.conventioncitoyennepourleclimat.fr/pdf/coc-rapport-final.pdf> p.235 et 247

## Secteur du transport aérien en France

Air France a annoncé en juillet 2020 vouloir **supprimer 16% de ses effectifs d'ici 2022**, la moitié de ces postes correspondant à des départs non remplacés. Cette décision difficile est cohérente avec un espoir de reprise du trafic en 2024 mais ne résout pas la question de l'emploi à long terme.

**40% des effectifs occupent un emploi dans des fonctions de support** dont le transfert vers d'autres secteurs d'activité pose a priori peu de problèmes. Pour le reste, **la catégorie d'emploi la plus représentée est celle du personnel navigant commercial (PNC) qui pèse pour 22% des emplois du secteur**<sup>26</sup>. Les PNC remplissent une mission de sûreté et de secourisme d'une part, de relation client d'autre part. Cette population est multilingue, adaptable, habituée aux déplacements et formée au secourisme, autant de **compétences précieuses dans une société bas-carbone : tourisme local, aide à la personne, transport ferré par exemple**. La piste ferroviaire doit toutefois être abordée avec prudence, car le développement du train est notamment conditionné par le **financement de la régénération des infrastructures**, donc par la **volonté publique durable** de soutenir un mode de transport longtemps délaissé hormis la grande vitesse. D'autre part, le report de la majorité des emplois ne sera pas possible sans accompagnement à la reconversion, donc sans planification.

## Secteur de l'industrie aéronautique

La plupart de nos scénarios impliquent une **limitation du trafic, donc une réduction de la taille des flottes** avec les impacts socio-économiques que l'on observe déjà dans le cadre de la crise sanitaire. Pour l'industrie aéronautique, **ce risque**

**est amplifié par la structure du marché**. Passer d'un marché d'équipement (majoritairement) à un marché de renouvellement est en théorie bénéfique sur la décarbonation puisque la diffusion du progrès technique est alors accélérée. A condition toutefois que les compagnies qui survivront à la crise sanitaire disposent de la trésorerie suffisante pour renouveler plus fréquemment leurs flottes. Impossible a priori sans initiatives réglementaires ni soutien financier supplémentaire. Et quand bien même, cela ne suffit hélas pas, dans la plupart des scénarios, à éviter une perte d'emploi en 2050.

Face à ce constat, **la diversification du tissu industriel permettrait de pallier la baisse d'emplois à court terme tout en augmentant la résilience du secteur et des économies locales dans lesquelles il s'insère, et de limiter à terme les risques d'un « syndrome de Détroit »**<sup>27</sup> qui préoccupe aujourd'hui la région toulousaine.

Un nouveau récit est à écrire. Celui-ci pourrait prendre la forme d'une **Alliance industrielle pour le climat, entité ad hoc en charge de réallouer les capacités productives actuellement sous-utilisées pour produire les équipements nécessaires à la transition énergétique**. Sans remettre en question les programmes industriels lancés par les grands donneurs d'ordre pour décarboner l'aviation par la voie technologique, cette Alliance pourrait jouer le rôle de **donneur d'ordre alternatif auprès de la chaîne de sous-traitance**, déchargeant ainsi les sociétés qui souhaiteraient la rejoindre des risques de la diversification. L'Alliance permettrait également **la mise en commun des ressources industrielles sous-utilisées afin de mutualiser les coûts de transformation vers une industrie plus compétitive et plus adaptable**.

En mettant le savoir-faire aéronautique au service de la lutte contre le changement climatique, l'Alliance se positionnerait ainsi comme un acteur manufacturier de premier plan pour la décarbonation de la France (ou encore mieux, de l'Europe) et participerait à l'effort de (re)localisation industrielle.

## 7 Conclusion

La limitation de nos émissions de GES et l'adaptation de nos sociétés aux conséquences du changement climatique sont une priorité de premier ordre. Le consensus scientifique incarné par le GIEC fait du budget carbone une métrique essentielle pour évaluer l'effort de transformation et les marges de manœuvre associées à un objectif climatique. **Définir un budget carbone sectoriel est donc un choix politique, préalable à l'élaboration de trajectoires** de réduction des GES. En son absence, nous avons retenu l'hypothèse neutre d'un budget carbone « 2°C » au prorata des émissions du secteur aérien en 2018.

Nos travaux montrent qu'**aucune trajectoire réaliste ne peut conduire à l'objectif sans réduire la croissance du trafic**. Respecter le budget carbone nécessite de conjuguer deux leviers : le **progrès des technologies décarbonantes** et **l'ajustement du trafic aérien** au rythme de leurs déploiements.

Si nos conclusions tranchent assurément avec l'optimisme des prévisions de croissance pré-COVID, **elles dessinent la voie d'une préservation durable du secteur, compatible avec les objectifs climatiques**, tout en limitant l'impact sur l'emploi. Mais ce scénario est d'autant moins probable que le secteur tarde à s'engager dans la trajectoire « 2°C » décrite dans ce rapport.

Le transport aérien fait partie de notre modernité, il nous a fait rêver, grandir, nous ouvrir aux autres. Pour que ce rêve demeure vivant face aux menaces du changement climatique, il est primordial de sortir du manichéisme et de partager une analyse lucide de la situation. L'ambition de ce travail est d'avoir jeté les bases d'une telle analyse et, au-delà, invité à une réflexion démocratique approfondie sur la place de l'aérien dans un monde bas-carbone.

27. Vers une crise économique majeure dans Toulouse et sa région. Toulouse, le syndrome Détroit ? par des représentants locaux de Copernic, Attac, l'Université Populaire de Toulouse et des Amis du Monde Diplomatique, le 22 avril 2020. Toulouse veut éviter le « syndrome Détroit », Matthieu Jublin, Alternatives économiques, le 17 juin 2020.

26. FNAM, Rapport de branche, 2019. <https://www.fnam.fr/presse/publications>

# Pouvoir voler en 2050

QUELLE AVIATION DANS  
UN MONDE CONTRAINT ?

**RAPPORT**

03 MARS 2021



Avec la contribution de :



# Table des Matières

|                                                                                                                                          |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>1 – Introduction</b>                                                                                                                  | <b>5</b>   |
| <b>2 – Sigles, acronymes, abréviations et jargon</b>                                                                                     | <b>6</b>   |
| <b>3 – Présentation des groupements de contributeurs</b>                                                                                 | <b>8</b>   |
| 3.1 – Le think tank The Shift Project                                                                                                    | 8          |
| 3.2 – Le collectif SUPAERO-DECARBO                                                                                                       | 8          |
| 3.3 – L'association The Shifters                                                                                                         | 8          |
| 3.4 – Citoyens Pour le Climat (CPLC)                                                                                                     | 8          |
| <b>4 – Enjeux énergie-climat : de quoi parle-t-on ?</b>                                                                                  | <b>9</b>   |
| 4.1 – Le réchauffement, d'où vient-il ?                                                                                                  | 9          |
| 4.2 – Un futur incertain, des risques à fort impact potentiel                                                                            | 16         |
| <b>5 – Situation du secteur aérien aujourd'hui</b>                                                                                       | <b>16</b>  |
| 5.1 – Quelques chiffres à retenir                                                                                                        | 16         |
| 5.2 – Bassins d'emplois                                                                                                                  | 16         |
| 5.3 – Missions                                                                                                                           | 17         |
| 5.4 – Usages et clientèle                                                                                                                | 17         |
| 5.5 – Les progrès techniques : Où en sommes-nous ?                                                                                       | 19         |
| 5.6 – Les organes de gouvernance                                                                                                         | 23         |
| 5.7 – Contribution du transport aérien<br>au changement climatique à ce jour                                                             | 25         |
| 5.8 – Situation du secteur en 2020, impacts de la crise du COVID-19                                                                      | 30         |
| 5.9 – Quelles projections carbone pour le secteur ?                                                                                      | 37         |
| 5.10 – Le plan de relance du gouvernement présenté en juin 2020                                                                          | 45         |
| 5.11 – Conclusion                                                                                                                        | 46         |
| <b>6 – Piloter les émissions totales du transport aérien au niveau national et international</b>                                         | <b>48</b>  |
| 6.1 – Définir un indicateur de mesure des émissions qui tienne compte de l'entière réalité<br>de l'impact climatique du transport aérien | 48         |
| 6.2 – Définir un budget carbone et une trajectoire à inclure, au niveau national, dans la SNBC                                           | 48         |
| 6.3 – Identifier une instance officielle nationale chargée de piloter la baisse des émissions                                            | 49         |
| 6.4 – Défendre un projet d'harmonisation entre CORSIA et les ETS régionaux                                                               | 49         |
| <b>7 – Proposition et évaluation de mesures de décarbonation sur le périmètre France</b>                                                 | <b>52</b>  |
| 7.1 – Introduction                                                                                                                       | 52         |
| 7.2 – Améliorer l'efficacité énergétique et émissive du transport aérien                                                                 | 52         |
| 7.3 – Adapter l'offre de l'aérien pour inciter à la sobriété et à la complémentarité<br>avec des modes de transport moins émissifs       | 80         |
| 7.4 – Proposition de pistes complémentaires pour rester dans le budget carbone                                                           | 88         |
| <b>8 – Les scénarios d'émissions à l'échelle monde</b>                                                                                   | <b>100</b> |
| 8.1 – Les hypothèses Monde                                                                                                               | 101        |
| 8.2 – Extension des scénarios « MAVERICK » et « ICEMAN » au périmètre Monde                                                              | 102        |
| 8.3 – Conclusions                                                                                                                        | 105        |
| <b>9 – Considérations sur le futur de l'emploi dans le secteur aérien</b>                                                                | <b>107</b> |
| 9.1 – Introduction                                                                                                                       | 107        |
| 9.2 – Scénarios Monde                                                                                                                    | 107        |
| 9.3 – Quels(s) futur(s) pour le transport aérien en France ?                                                                             | 110        |
| 9.4 – Quel(s) futur(s) pour l'industrie aéronautique ?                                                                                   | 113        |
| 9.5 – Conclusion                                                                                                                         | 119        |
| <b>10 – Aller plus loin</b>                                                                                                              | <b>120</b> |
| <b>11 – Conclusion</b>                                                                                                                   | <b>120</b> |
| <b>12 – Un mot du Directeur Général de l'ISAE-SUPAERO</b>                                                                                | <b>121</b> |
| <b>13 – Annexes</b>                                                                                                                      | <b>122</b> |
| 13.1 – Annexe 1: Idées recues sur les carburants alternatifs                                                                             | 122        |
| 13.2 – Annexe 2: Approfondissement sur les technologies SETI, SETO et STAR                                                               | 125        |
| 13.3 – Annexe 3: Situation du secteur en 2020, impacts de la crise COVID-19                                                              | 126        |

# 1 Introduction

**La crise sanitaire et économique qui frappe le monde est inédite à bien des aspects.** Survenue de manière soudaine et violente, elle s'inscrit aujourd'hui dans la durée. Elle éprouve fortement nos sociétés mondialisées et met en évidence leurs vulnérabilités. La société française ne fait pas exception. Le secteur de l'aéronautique en particulier, fleuron de l'industrie française et vecteur de son rayonnement international, subit, comme le transport aérien, l'une des pires crises de son histoire. Étant parmi les plus directement exposés aux conséquences de la pandémie de Covid-19, il a été l'un des premiers secteurs à bénéficier de l'aide de l'État et à faire l'objet d'un plan de relance présenté le 9 juin 2020 par le gouvernement.

**Mais cette crise ne doit nous faire oublier que d'autres menaces se profilent.** Les conséquences du changement climatique, des tensions sur l'approvisionnement en énergie ou en ressources essentielles, l'altération de la biodiversité sont autant de bouleversements qui affecteront davantage encore le système socioéconomique français et international. Les transformations d'ampleur à engager pour y faire face (décarbonation de l'économie, adaptation aux chocs) représentent un défi historique qui concerne tous les acteurs, publics comme privés.

**L'opportunité se présente d'orienter la relance du secteur aéronautique et l'utilisation de l'argent public vers des trajectoires compatibles avec les enjeux climatiques et moins dépendantes des approvisionnements en énergies fossiles.**

En mai 2020, le *Shift Project* a publié un premier rapport sur le transport aérien intitulé *Crise(s), climat : préparer l'avenir de l'aviation*. **La présente étude retravaille les mesures identifiées dans la version précédente, élargit le spectre et l'horizon des propositions, intègre les remarques et les objections formulées depuis lors, notamment par les professionnels du secteur.** Nous proposons ici une étude factuelle et quantitative, basée sur une analyse par scénarios, des trajectoires d'émissions de l'aviation d'ici 2050. Nous adoptons une approche holistique englobant les hypothèses technologiques et énergétiques, les prérequis de leur réalisation, ainsi que les impacts sur les usages et les emplois. L'utilisation des ressources (autres qu'électricité et carburants) et le financement sont des dimensions bien identifiées (souvent déterminantes) mais non quantifiées dans les scénarios.

Le transport aérien, international par nature, requiert un consensus de tous les États (a minima européens dans un premier temps) pour mettre en œuvre sa décarbonation. **Quelles seraient en effet les bénéfices d'efforts consentis dans une région du globe si, dans une autre, les émissions n'étaient pas encadrées ?** En cas de non-alignement sur les objectifs et les réglementations, le caractère fortement concurrentiel du transport aérien jouerait inévitablement en défaveur des premiers acteurs à se lancer dans une stratégie bas-carbone. À ce titre, le rapport se penche sur les éléments de gouvernance internationale actuels, en l'occurrence le programme CORSIA<sup>2</sup>

de l'OACI (Organisation de l'Aviation Civile Internationale) et le marché du carbone européen EU-ETS (*European Union Emissions Trading System*), en pointe les atouts et les limites et recommande des ajustements.

Bien que nécessaire, la mise en œuvre d'un accord international sur la décarbonation du secteur aérien prendra du temps. Dans l'intervalle, l'État français, qui s'est particulièrement intéressé au secteur à travers son plan de soutien à l'aéronautique présenté le 9 juin 2020, peut intervenir efficacement à l'échelle nationale sans attendre l'atteinte d'un consensus plus large. Dans un contexte d'urgence climatique où le temps joue contre nous, ce rapport défend ainsi la nécessité d'agir conjointement aux niveaux national et international.

Notre analyse s'articule de la manière suivante :

- 1. Dans un premier temps, nous proposons des trajectoires possibles de réduction des impacts climatiques du transport aérien** compatibles avec les objectifs de l'Accord de Paris, soit « contenir le réchauffement climatique en dessous des 2°C par rapport à l'époque préindustrielle ». Nous défendons pour cela l'impératif de s'accorder sur un budget carbone pour le transport aérien, que nous calculons à l'horizon 2050 sur la base de ceux définis par le GIEC.
- 2. Dans un second temps, nous identifions et chiffrons les mesures d'efficacité énergétique et de décarbonation à court, moyen et long terme** ainsi que les prérequis (technologiques, énergétiques, organisationnels) qui les sous-tendent, dans le but de minimiser les impacts sur le trafic aérien et de préserver son rôle au niveau mondial et son importance stratégique pour la France, notamment sur le plan industriel.
- 3. Dans l'hypothèse où ces mesures se révéleraient insuffisantes pour atteindre l'objectif de décarbonation, nous énumérons un ensemble de mesures de sobriété** complémentaires permettant de rester dans une trajectoire « 2°C », assorties d'une réflexion sur les modalités de leur mise en œuvre ainsi que les usages et le rôle de l'aviation à horizon 2050.
- 4. Enfin, nous étudions les conséquences de ces mesures sur l'emploi en France** dans le transport aérien (compagnies et aéroports) et l'industrie aéronautique. Nous réfléchissons aux pistes de diversification et de reconversion des professionnels et des sites de production, en les insérant dans la proposition d'un nouveau récit industriel.

<sup>2</sup> Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation, cf. 4.6.2

## 2

# Sigles, acronymes, abréviations et jargon

**ACU, Air Conditioning Unit :** Groupe mobile de climatisation, principale alternative à l'APU pour climatiser la cabine au sol, utilisant généralement un moteur diesel sur châssis mobile. L'ACU émet du CO<sub>2</sub> mais dans des proportions bien inférieures à l'APU (rapport de 1 à 10).

**ADEME, Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie.**

**ADP, Aéroports de Paris :** Entreprise française qui construit, aménage et exploite les aéroports de Paris et de sa région, dont Paris-Orly, Paris-Charles-de-Gaulle et Paris-Le Bourget.

**AF, Air France :** Compagnie aérienne française.

**AFOLU, Agriculture, Forestry and Other Land Use<sup>2</sup> :** Agriculture, foresterie et changement d'utilisation des terres. Secteur responsable d'environ 25% des émissions de gaz à effet de serre d'origine anthropique (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> et N<sub>2</sub>O majoritairement).

**APU, Auxiliary Power Unit :** En français GAP (Groupe Auxiliaire de Puissance). Moteur auxiliaire destiné à produire de l'énergie à bord (hors propulsion) quand les moteurs principaux sont éteints ou en cas de panne en vol (électricité à bord, climatisation, pression hydraulique, ...).

**ART, Autorité de Régulation des Transports :** Autorité Publique Indépendante pour la régulation économique du transport ferroviaire, autoroutier et aéroportuaire.

**ATAG, Air Transport Action Group :** Coalition indépendante d'organisations et entreprises de l'industrie du transport aérien au niveau international.

**CDG, Aéroport de Paris Charles de Gaulle (à Roissy) :** Aéroport exploité par ADP, premier aéroport en France et deuxième en Europe pour son trafic de passagers

**CESE, Conseil Économique, Social et Environnemental :** Organisme potentiel pour créer et promouvoir un portail public officiel du secteur du transport longues distances afin d'informer et sensibiliser les parties prenantes à hauteur des enjeux.

**CI, Cost Index :** Coefficient représentant le ratio entre le coût du temps (durée) et le coût du fuel.

**CITEPA, Centre Inter-professionnel Technique d'Études de la Pollution Atmosphérique.**

**CORSIA, Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation :** Adopté en 2016 par l'OACI, ce "Régime de compensation et de réduction de carbone pour l'aviation internationale" oblige les compagnies aériennes de compenser les émissions de CO<sub>2</sub> supérieures à celles émises en 2019.

**CSP, Catégorie Socio Professionnelle :** La majorité des vols sont effectués par une CSP très élevée, représentant une minorité de la population.

**DGAC, Direction Générale de l'Aviation Civile :** Administration responsable de la sécurité du transport aérien, de la gestion du trafic aérien, de la régulation du marché, de la surveillance et de la certification de l'ensemble des acteurs de l'aviation civile.

**DGEC, Direction Générale de l'Énergie et du Climat :** Administration responsable pour définir la politique énergétique de la France ainsi que l'approvisionnement en matières premières minérales.

**EASA, European Union Aviation Safety Agency :** L'Agence européenne de la sécurité aérienne est une agence de l'Union européenne qui traite de la sécurité aérienne.

**EEA, European Economic Area :** Zone considérée dans les mécanismes de compensation et réduction carbone

**ETS, Emissions Trading System :** Mécanisme de droits d'émissions de dioxyde de carbone mis en œuvre au sein de l'Union européenne.

**EUA, Emission Unit Allowance :** Crédits du système EU-ETS

**FAA, Federal Aviation Administration :** Equivalent de l'EASA aux États-Unis

**FAO, Food and Agriculture Organization :** Agence des Nations Unies dont l'objectif est d'éliminer la faim dans le monde, fourni des informations essentielles sur la production d'éthanol, utilisées dans la section des carburants alternatifs

**GES, Gaz à effet de serre :** Composants gazeux qui contribuent à l'effet de serre, principalement le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), le méthane (CH<sub>4</sub>) et le protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O).

**GIE, Groupement d'intérêt économique.**

**GIEC, Groupe d'experts inter-gouvernemental sur l'évolution du climat :** Groupe d'experts fournissant des évaluations détaillées de l'état des connaissances scientifiques, techniques et socio-économiques sur les

<sup>2</sup> <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3/agriculture-forestry-and-other-land-use-afolu/>

changements climatiques, leurs causes, leurs répercussions potentielles et les stratégies de parade. Elles sont disponibles dans les rapports d'évaluation multivolumes.

**GIFAS, Groupement des Industries Françaises Aéronautiques et Spatiales.**

**HLFC, Hybrid Laminar Flow Control :** Concept pour améliorer l'écoulement de l'air de niveau de maturité faible.

**IAG, International Airlines Group :** Un des plus grands groupements de compagnies aériennes. Ils sont engagés à réduire leur empreinte carbone et atteindre l'objectif net zéro d'émissions CO<sub>2</sub> pour 2050.

**IATA, International Air Transport Association :** Organisation internationale de sociétés de transport aérien, met à disposition les informations telles que la demande pour le transport aérien et les impacts de la crise COVID.

**LFC, Laminar Flow Control :** Concept pour améliorer l'écoulement de l'air de niveau de maturité faible.

**LRC, Long Range Cruise :** Vitesse traditionnelle pour la phase de croisière de vol.

**LTO, Landing & Take-Off :** Regroupe les phases de vol du décollage, du début de montée jusqu'à 3000ft (915m), de l'approche et de l'atterrissage.

**MRO, Maintenance, Repair and Overhaul :** Acteurs du secteur aérien spécialisés sur les opérations de Maintien en Conditions Opérationnelles des aéronefs.

**MRV, Monitoring, Reporting, Verification :** Processus de surveillance, de déclaration et de vérification pour la comptabilité carbone.

**NAT, North Atlantic Tracks, Voies aériennes importantes,** ou les avions sont contraints de voler à vitesses similaires, imposées par le contrôle aérien pour assurer leurs distances de séparation sur l'ensemble de la traversée.

**NEO, New Engine Option :** Famille d'avion dont les moteurs présentent une amélioration d'efficacité au niveau de la consommation du carburant.

**NLF, Natural Laminar Flow :** Laminarité naturelle, technologie actuellement utilisée.

**OACI, Organisation de l'Aviation Civile Internationale, En anglais : ICAO.** Organisation internationale qui dépend de l'ONU. Son rôle est de participer à l'élaboration des politiques et des normes qui permettent la standardisation du transport aéronautique international (les vols à l'intérieur d'un même pays ne sont pas concernés par l'OACI).

**OCDE, Organisation de coopération et de développement**

**économiques :** Organisation internationale d'études économiques, elle fournit notamment des informations essentielles sur la production d'éthanol, utilisées dans la section des carburants alternatifs.

**OMC, Organisation Mondiale du Commerce :** Organisation internationale régissant les règles du commerce international entre les pays.

**ORY, Aéroport de Paris Orly :** Aéroport exploité par ADP.

**PTL, Power-to-liquids :** Type de carburant alternatif, consiste en une production d'hydrocarbures liquides conçus à partir d'énergie électrique, de H<sub>2</sub> et de CO<sub>2</sub>.

**R&D, Recherche et Développement.**

**RPK, Revenue Passenger Kilometer :** Métrique qui décrit le nombre de kilomètres parcourus par passager payant.

**RTK, Revenue Ton Kilometers :** Métrique qui décrit le nombre de kilomètres parcourus par tonne rémunérante (notamment utilisée pour le fret).

**SAF, Sustainable Aviation Fuels :** Carburant alternatif drop-in certifié dont les considérations sociales, environnementales et économiques assurent un avantage par rapport au kérosène.

**SCEQE, Système Communautaire d'Echange de Quotas d'Emissions : En anglais : EU-ETS.** Mis en œuvre au niveau de l'Union européenne.

**SES, Single European Sky :** Projet européen dont l'objectif principal est de s'affranchir des frontières entre pays afin d'optimiser les flux de trafic.

**SETI, Single Engine Taxi-In :** L'utilisation d'un seul moteur pour la phase de roulage après atterrissage (taxi-in). Déjà utilisé par les compagnies aériennes à près de 50% à dire d'expert.

**SETO, Single Engine Taxi-Out :** Similaire que SETI mais pour la phase avant décollage (taxi-out).

**SNBC, Stratégie Nationale Bas Carbone.**

**SNICAC, Syndicat National des Ingénieurs et Cadres de l'Aviation Civile.**

**SR15, Rapport spécial du GIEC 1,5°C :** [15ème rapport spécial du GIEC sur un réchauffement planétaire de 1,5 °C.](#)

**SRIA, Strategic Research and Innovation Agenda.**

**STAR, Système de Traction des Avions au Roulage.**

**TLS, Aéroport de Toulouse-Blagnac.**

## 3 Présentation des groupements de contributeurs

### Le think tank The Shift Project



*The Shift Project* est un think tank qui œuvre en faveur d'une économie post-carbone. Association loi 1901 reconnue d'intérêt général et guidée par l'exigence de la rigueur scientifique, sa mission est d'éclairer et influencer le débat sur la transition énergétique et climatique en Europe. Éclairer : nous constituons des **groupes de travail** autour des enjeux les plus délicats et les plus décisifs de la transition vers une économie post-carbone ; nous produisons des **analyses** robustes et chiffrées sur les aspects clés de la transition ; nous élaborons des **propositions** innovantes, avec le souci d'apporter des réponses à la bonne échelle. Influencer : nous menons des campagnes de **lobbying** pour promouvoir les recommandations de nos groupes de travail auprès des décideurs politiques et économiques ; nous organisons des événements qui favorisent les discussions entre parties prenantes ; nous bâtissons des **partenariats** avec les organisations professionnelles, le monde universitaire et des acteurs internationaux.

Le *Shift* a été fondé en 2010 par plusieurs personnalités du monde de l'entreprise ayant une expérience de l'associatif et du public – dont son actuel président Jean-Marc Jancovici (par ailleurs membre du Haut Conseil pour le climat et associé du cabinet Carbone 4). Le *Shift* est soutenu en 2020 par plusieurs **grandes entreprises** françaises et européennes, ainsi que quelques organismes publics et associations d'entreprises.

Le *Shift* a été créé afin de mobiliser les entreprises et les pouvoirs publics sur les risques, mais surtout sur les opportunités de long terme engendrées par **l'approvisionnement énergétique et le changement climatique** et cela dans une tradition française d'optimisation sous contrainte, où il est essentiel de bien hiérarchiser l'efficacité potentielle des diverses manières de s'attaquer à la question. *The Shift Project* s'adresse avant tout aux décideurs et aux corps intermédiaires.

Depuis sa création, *The Shift Project* a initié **plus de 20 projets d'étude**, participé à l'émergence de 2 manifestations internationales (Business and Climate Summit, World Efficiency), et organisé plus de 60 colloques, forums, ateliers et conférences. Il a pu influencer significativement plusieurs décisions politiques importantes pour la transition énergétique, en France et au sein de l'Union européenne.

La démarche du *Shift* est marquée par un **prisme d'analyse particulier**, fondé sur la conviction que l'énergie est un facteur de premier ordre de développement : dès lors, les risques induits par le changement climatique, intimement liés à l'usage de l'énergie, relèvent d'une complexité systémique et transdisciplinaire particulière. Les enjeux climat-énergie conditionnent l'avenir de l'humanité, et il est nécessaire d'intégrer cette dimension le plus rapidement possible à notre modèle de société.

### Le collectif SUPAERO-DECARBO



**SUPAERO-DECARBO est un collectif de plus de 100 anciens et actuels élèves de l'école ISAE-SUPAERO** dont plus de la moitié est en poste dans l'industrie aéronautique ou le transport aérien. Passionnés d'aviation et intimement concernés par la problématique du changement climatique et de ses conséquences pour la vie sur terre, ils ont à cœur de porter un discours de vérité sur la contribution du secteur aérien au changement climatique, scientifiquement étayé, permettant d'envisager le futur de l'aviation sur des bases saines dans un monde bas-carbone.

Les SUPAERO-DECARBO portent une parole indépendante de celle de l'école ISAE-SUPAERO, leurs travaux et leurs prises de positions n'engagent en rien cette dernière.

### L'association The Shifters



**The Shifters est un réseau de bénévoles en soutien au Shift Project.** De profils, expériences et compétences très variés, ils se rejoignent par leur intérêt pour la transition carbone de l'économie et se consacrent à trois types de missions :

1. Appuyer *The Shift Project* dans ses travaux, en mettant ponctuellement à disposition de l'équipe du *Shift* leur force de travail et/ou leurs compétences.
2. S'informer, débattre et se former sur la décarbonation de l'économie (sous ses aspects aussi bien scientifiques que techniques et politiques, au sens large, et en termes d'enjeux, d'acteurs, de solutions et d'actualité).
3. Diffuser les idées et travaux du *Shift* dans leurs propres réseaux et développer de nouveaux réseaux dans la décarbonation de l'économie. Ils s'appuient pour ce faire sur les cinq valeurs fondamentales que sont l'exigence scientifique et technique, l'ouverture, l'impartialité, le professionnalisme et la convivialité.

### Citoyens Pour le Climat (CPLC)



Citoyens Pour Le Climat<sup>3</sup> est un collectif né à l'automne 2018 lors des premières marches citoyennes pour le Climat qui ont suivies la démission de Nicolas Hulot de son poste au gouvernement. **C'est un collectif apaisé, non violent qui a pour vocation de vulgariser les enjeux climatiques et d'informer le grand public sur la base des faits scientifiques établis.** Le collectif est marrainé par Valérie Masson-Delmotte, co-présidente du Groupe de Travail 1 du GIEC et membre du Haut Conseil pour le Climat.

3 <https://citoyenspourleclimat.org/>

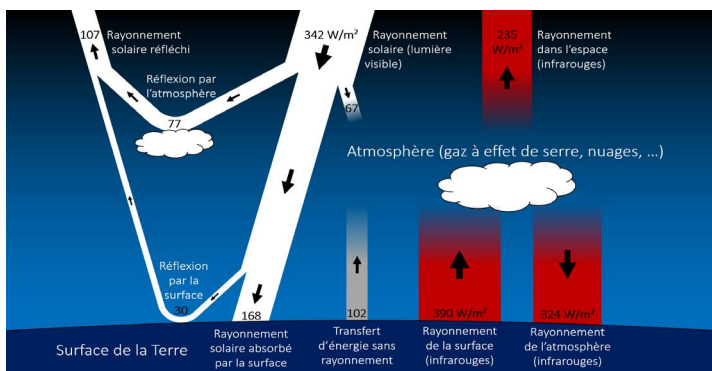
## 4 Enjeux énergie-climat : de quoi parle-t-on ?

### 4.1 Le réchauffement, d'où vient-il ?

**Avant de rentrer dans le vif du sujet, il est nécessaire de présenter quelques notions essentielles, nécessaires à la compréhension de la façon dont les activités humaines en général, et le transport aérien en particulier, contribuent au réchauffement climatique.**

Notre planète absorbe une énergie provenant du Soleil qui la réchauffe. Comme tout objet, plus notre planète est chaude, plus elle réémet à son tour d'énergie vers l'espace, ce qui la refroidit. La Terre trouve ainsi toujours une température qui équilibre la puissance (énergie par seconde) absorbée et la puissance émise. Plus chaude, la puissance émise est supérieure à puissance absorbée, ce qui la refroidit ; plus froide, la puissance absorbée est supérieure à la puissance émise, ce qui la réchauffe. Dans un cas comme dans l'autre, la température retourne à la température d'équilibre.

Avant 1750 et le début de la révolution industrielle<sup>4</sup>, notre planète était à sa température d'équilibre. Les puissances absorbées et émises équilibrées valaient en moyenne  $235 \text{ W.m}^{-2}$  <sup>5</sup>.



**Figure 1 - Représentation schématisée de l'équilibre énergétique annuel moyen global de la Terre à l'ère préindustrielle, d'après le 4ème rapport d'évaluation du GIEC, groupe de travail I, FAQ 1.1, Figure 1 page 96. ([https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/ar4\\_wg1\\_full\\_report-1.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/ar4_wg1_full_report-1.pdf))**

Or, depuis 1750, l'humanité a multiplié par près de 1,5 la concentration de  $\text{CO}_2$  dans l'atmosphère tout en y ajoutant d'autres gaz à effet de serre. Ces gaz, les GES (Gaz à Effet de Serre), renvoient une partie des infrarouges émis par la Terre et diminuent ainsi la puissance émise vers l'espace. En conséquence, la Terre est en train de se réchauffer vers une température, plus élevée, qui va à nouveau équilibrer la puissance absorbée et celle émise. Dit autrement, tant que nous émettons des GES, nous augmentons la température d'équilibre de la Terre, avec un risque d'amplification du phénomène du fait de boucles de rétroactions complexes (diminution de l'albédo, fonte du permafrost, ...). Stabiliser le réchauffement nécessite donc de ne plus réaliser aucune émission nette, ce qui peut être

accompli en stoppant volontairement toutes nos émissions de gaz à effet de serre, ou bien, de manière plus pragmatique, en divisant par 10 nos émissions et en augmentant la capacité des puits de carbone terrestres pour absorber les émissions restantes, par exemple grâce à la reforestation<sup>6</sup>. L'écart final à la température actuelle sera conditionné par la quantité de GES qui sera émise avant d'atteindre la neutralité carbone nette.

Pour quantifier la perturbation du bilan de puissance de la Terre par rapport à l'équilibre préindustriel (1750), les scientifiques ont historiquement introduit la notion de forçage radiatif (« Radiative Forcing » ou RF en anglais) puis de forçage radiatif effectif (Effective Radiative Forcing ou ERF en anglais). Pour une explication détaillée de ces termes, on peut se référer au 5<sup>ème</sup> rapport du GIEC (2013) déjà cité, mais retenons pour simplifier que l'ERF est plus pertinent car, contrairement au RF qui ne tient compte que des ajustements stratosphériques<sup>7</sup>, il prend en compte ce qu'on appelle les « ajustements rapides » du climat (ajustements troposphériques<sup>8</sup> et ajustements liés à l'utilisation des sols<sup>9</sup>) : le RF entraîne des ajustements rapides, qui modifient à leur tour le RF pour donner l'ERF, comme dans une boucle de rétroaction. L'ERF est utile car il permet d'estimer la valeur ET la vitesse du réchauffement de notre planète : un forçage radiatif effectif plus grand donne un réchauffement plus important ET plus rapide.

Le forçage radiatif effectif anthropogénique était évalué à  $2,29 [1,13 - 3,33] \text{ W.m}^{-2}$  pour l'année 2011<sup>10</sup>, ce qui signifie que si l'on prenait la Terre à l'équilibre telle qu'elle était en 1750 et qu'on lui appliquait instantanément la composition de l'atmosphère et l'usage des sols de 2011, le flux de chaleur additionnel reçu à la surface de la Terre serait de  $2,29 \text{ W.m}^{-2}$ <sup>11</sup>.

<sup>6</sup> Scénario P1 page 16 et explications pages suivantes in GIEC, 2018, Résumé à l'intention des décideurs, Réchauffement planétaire de  $1,5^\circ\text{C}$ , Rapport spécial du GIEC sur les conséquences d'un réchauffement planétaire de  $1,5^\circ\text{C}$  par rapport aux niveaux préindustriels et les trajectoires associées d'émissions mondiales de gaz à effet de serre, dans le contexte du renforcement de la parade mondiale au changement climatique, du développement durable et de la lutte contre la pauvreté

<sup>7</sup> La stratosphère est la couche de l'atmosphère dont la limite se situe à partir de 6 km d'altitude aux pôles et à partir de 16 km à l'équateur

<sup>8</sup> Les ajustements troposphériques, c'est-à-dire ceux se produisant dans la troposphère (couche inférieure de l'atmosphère, allant jusqu'à 6 km aux pôles et 16 km à l'équateur), incluent notamment les modifications de l'intensité de la convection, de l'efficacité des précipitations, de la nébulosité, de la durée de vie et de la teneur en eau des nuages, et de la formation ou la disparition des nuages dans des zones isolées, en raison d'altérations de la circulation. Dans le cas de l'aviation, le fait d'ajouter des aérosols dans l'atmosphère augmente directement et instantanément la quantité de nuages comme on peut le voir avec les traînées de condensation des avions.

<sup>9</sup> Modifications de l'usage des sols, qui en changeant la couleur globale et donc la part de puissance absorbée et réfléchie

<sup>10</sup> Figure RID.5, page 14, in GIEC, 2013, Résumé à l'intention des décideurs, Changements climatiques 2013 : Les éléments scientifiques. Contribution du Groupe de travail I au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

<sup>11</sup> Ce chiffre ne prend pas en compte les variations lentes, comme le réchauffement qui intervient sur plusieurs décennies et va rééquilibrer le bilan de puissance à  $0 \text{ W.m}^{-2}$  à la nouvelle température d'équilibre, ni les variations indirectes, comme les rétroactions (notamment la fonte de la banquise très réfléchissante, remplacée par un océan sombre, augmentant la puissance absorbée).

<sup>4</sup> Wikipedia : article Révolution Industrielle, section Première révolution industrielle

<sup>5</sup> D'après la FAQ1.1 in IPCC, 2007, Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change

Le CO<sub>2</sub> est de loin le premier contributeur au forçage radiatif effectif anthropogénique. En 2011, le CO<sub>2</sub> contribuant à lui seul à hauteur de 73% (1,68 des 2,29 W.m<sup>-2</sup>) au forçage radiatif effectif d'origine humaine. C'est pour cela qu'on rapporte les émissions des autres gaz à effet de serre à ce dernier avec des « équivalents CO<sub>2</sub> ».

## 4.2 Un futur incertain, des risques à fort impact potentiel<sup>12</sup>

**Le réchauffement climatique, causé par les émissions de GES d'origine anthropique, fait peser sur le vivant terrestre en général, et sur les sociétés humaines en particulier, des risques et des bouleversements d'une ampleur inédite.** Ces risques, décrits et évalués par le GIEC<sup>13</sup>, menacent en premier lieu l'habitabilité humaine des surfaces émergées, l'accès aux ressources essentielles (eau, nourriture), la paix, et bien sûr sont de nature à bouleverser les organisations sociétales et les systèmes économiques<sup>14</sup>.

Afin de maîtriser au mieux ces risques, un consensus international a émergé, au travers des Accords de Paris en 2015, sur la nécessité de s'engager dans la réduction des émissions de GES au niveau de chaque pays. Réduire ses émissions de GES et s'adapter aux conséquences du changement climatique constitue la base d'un projet global de transformations liées aux enjeux énergie-climat d'atténuation et d'adaptation.

**Ces transformations sont, elles aussi, marquées par leur ampleur et leur incertitude.** Faute de pilotage et d'anticipation, ces transformations seront pour partie subies, et pourraient intervenir d'une manière chaotique à travers de profondes ruptures d'ordres technologique, politique, diplomatique, économique et sociale. Celles-ci constituent une menace pour la stabilité du système socio-économique mondial.

### 4.2.1 L'énergie, principale clef de la problématique climatique

**Les enjeux soulevés par le changement climatique et son impact sur la société n'ont jamais été aussi prégnants.**

<sup>12</sup> Ce passage est en grande partie issu d'un précédent rapport du Shift publié avec l'Association française des entreprises privées (Afepe) : « Scénarios énergie-climat : Évaluation et Mode d'emploi » (2019) p17-20. Il a été mis à jour et complété.

<sup>13</sup> GIEC, 2019: Résumé à l'intention des décideurs, Changement climatique et terres émergées: rapport spécial du GIEC sur le changement climatique, la désertification, la dégradation des sols, la gestion durable des terres, la sécurité alimentaire et les flux de gaz à effet de serre dans les écosystèmes terrestres. ([https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2020/06/SRC-CL\\_SPM\\_fr.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2020/06/SRC-CL_SPM_fr.pdf))

<sup>14</sup> Concrètement, il se traduisent, au niveau planétaire, entre autres par l'augmentation des sécheresses, de la fréquence, de l'intensité et de la durée des épisodes caniculaires, de la fréquence des épisodes cycloniques, augmentation du niveau de la mer (donc diminution des surfaces émergées habitables), la baisse des rendements agricoles entraînant eux-même des risques de famines, de mouvements massifs de populations vers les zones mieux préservées et de conflits pour l'accès aux ressources. Les tensions internationales seront d'autant plus accentuées que ces risques sont inégalement répartis sur la surface terrestre.

**Il existe aujourd'hui un consensus général en ce qui concerne la source de ces bouleversements.** C'est l'émission de quantités croissantes de GES et l'accroissement de leur concentration dans l'atmosphère qui alimentent le réchauffement climatique dans des proportions alarmantes. Plus encore que les niveaux atteints, c'est la vitesse à laquelle ces phénomènes s'opèrent qui est préoccupante.

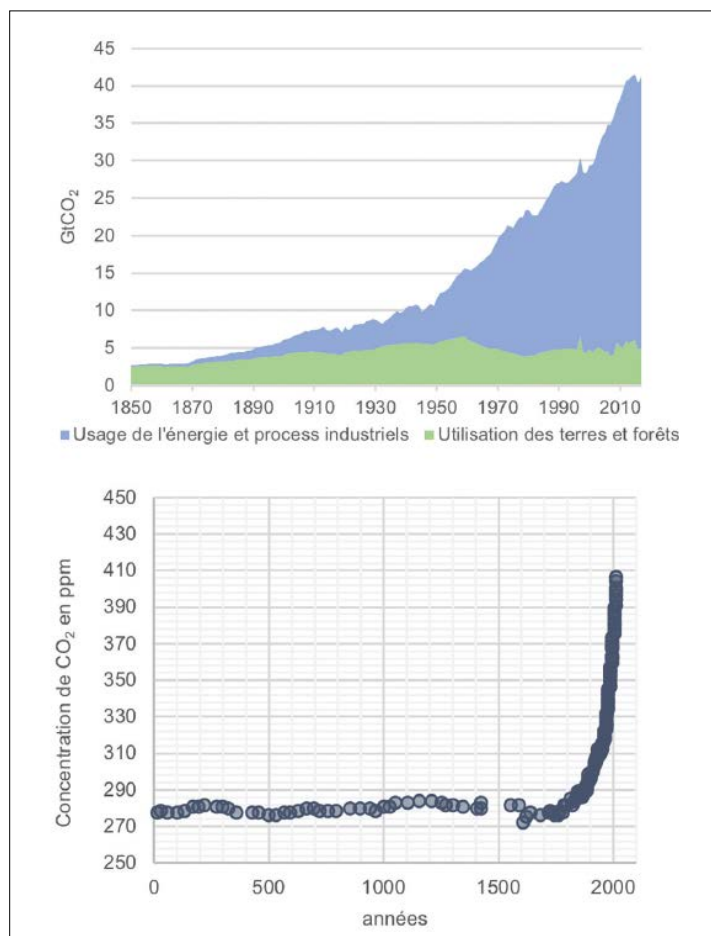


Figure 2 – Évolution des émissions de CO<sub>2</sub> atmosphériques depuis 1850 jusqu'à aujourd'hui, par source (en haut) et évolution de la concentration de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère depuis le début de l'ère moderne jusqu'à 2019 (en bas) [Source : Global Carbon budget et Scripps CO<sub>2</sub> Program]

Les conséquences de ce phénomène physique sont connues depuis longtemps : au-delà des découvertes d'Arrhenius qui remontent à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, elles suscitaient déjà des inquiétudes scientifiques dès 1953<sup>15</sup>, de larges préoccupations collectives depuis la fin des années 1960<sup>16</sup>, et de quasi-consensus depuis le sommet de Rio en 1992.

**Entre 1876 et 2017, ce sont près de 2 220 GtCO<sub>2</sub> qui ont été rejetées dans l'atmosphère** (sur un total de l'ordre de 3 000 GtCO<sub>2</sub>, budget qui permettraient de limiter le réchauffement à 2°C) entraînant un réchauffement de l'ordre de 1°C au-dessus des niveaux préindustriels. Si le taux d'augmentation des températures actuel se maintient, le réchauffement planétaire devrait être de l'ordre de 1,5°C d'ici 2040<sup>17</sup>.

<sup>15</sup> Voir "Energy in the future" by Palmer Cosslett Putnam, consultant to the United States Atomic Energy Commission, 1953

<sup>16</sup> Voir "The Historical Roots of Our Ecologic Crisis" by Lynn White, Jr. – Science, 1967 (Lynn White, 1967)

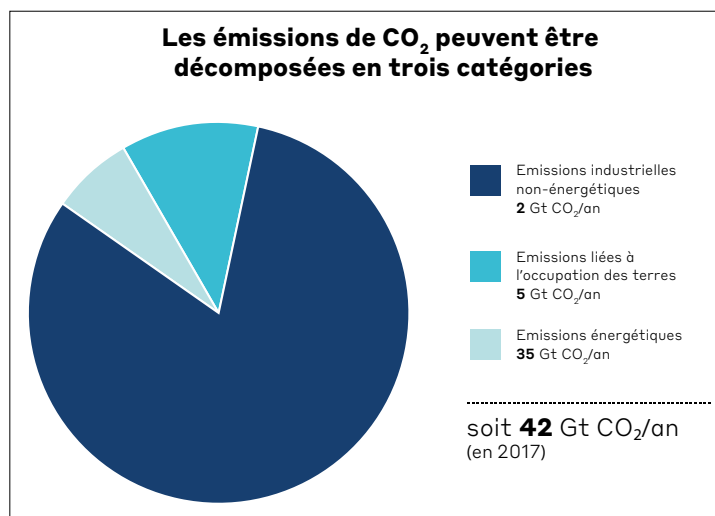
<sup>17</sup> Voir chapitre 2 du Rapport spécial 1.5°C, GIEC (2018), figure 2.3, p105

**Les émissions de CO<sub>2</sub>**, qui culminent en 2017 à près de 42 milliards de tonnes de CO<sub>2</sub><sup>18</sup> (hors autres gaz du protocole de Kyoto) peuvent être décomposées en trois catégories :

**1. Les émissions énergétiques** (i.e. production de chaleur et d'énergie mécanique par combustion. C'est dans cette catégorie que l'on retrouve les émissions liées au transport aérien) sont les plus importantes et représentent près de 35 GtCO<sub>2</sub>/an.

**2. Les émissions industrielles non-énergétiques** qui recouvrent les émissions liées aux processus industriels (production de ciment<sup>19</sup>, chimie lourde, etc.) et qui représentent de 2 à 3 GtCO<sub>2</sub>/an<sup>20</sup>.

**3. Les émissions liées à l'occupation des terres** qui représentent près de 5 GtCO<sub>2</sub>/an.

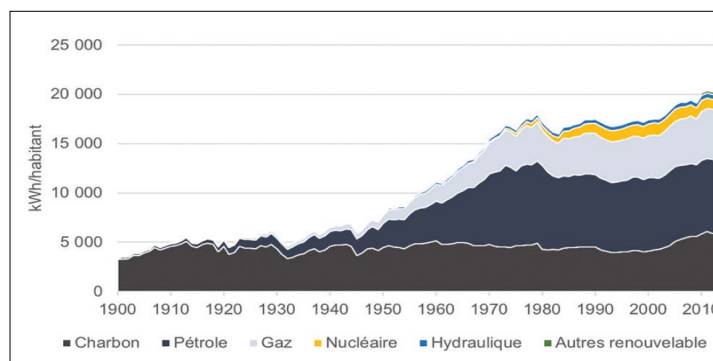


**Le paramètre « énergétique » a été et demeure un facteur essentiel de développement des sociétés.**

Par définition, l'énergie est la grandeur physique qui mesure le « changement d'état d'un système ». Autrement dit, lorsqu'un système se transforme, il nécessite l'utilisation d'énergie. La quantité d'énergie mobilisée caractérise le degré de cette transformation. C'est, entre autres, le cas des changements de température, de forme, de vitesse, ou de composition chimique.

Or, du point de vue ressource/énergie, une société humaine peut être considérée comme un système qui extrait, transforme, travaille, et déplace des ressources minérales ou biologiques puisées dans l'environnement, afin de produire les biens et les services que les individus consomment pour satisfaire leurs besoins.

Dès lors, la découverte puis l'usage croissant d'énergie primaire<sup>21</sup> notamment via des « convertisseurs » capables de la transformer en énergie mécanique (machine à vapeur, moteur à combustion interne, turbines, etc.) – ainsi que l'augmentation de tous les flux physiques qui sous-tendent les activités de production – ont joué un rôle de premier ordre dans l'accroissement de la productivité du travail et dans l'expansion économique, sociale et démographique des sociétés humaines.



**Figure 3 : Consommation d'énergie primaire par habitant dans le monde de 1900 à 2015 (hors bois).**

[Source : TSP data portal et UN statistics division]

**Cette expansion s'est accélérée mondialement au XIX<sup>e</sup> siècle grâce à l'usage massif des énergies fossiles dans tous les secteurs de l'économie, de l'agriculture à l'industrie, en passant par le transport.** Au cours de l'année 2016 par exemple, près de 13 760 Mtep d'énergie primaire ont été consommées dans le monde, dont 32% de pétrole, 22% de gaz et 27% de charbon<sup>22</sup>.

**Depuis près de 200 ans, nos sociétés ont dimensionné leur développement sur une abondance d'énergie inédite d'origine fossile.** La production d'électricité, l'activité industrielle (métallurgie, cimenterie et chimie essentiellement), l'aménagement du territoire, le commerce avec le raccourcissement des distances et du temps, l'augmentation des rendements agricoles, mais aussi les avancées sociales (confort matériel, progrès sanitaires, éducation, sécurité, tourisme de masse, etc.), et plus récemment le numérique<sup>23</sup> ont été rendues possibles par cette abondance.

**Ainsi, dans un pays « développé », faire face au dérèglement climatique relève pour cette raison d'une problématique de changement d'une difficulté et d'une complexité particulières.** Ce changement nécessite de questionner le recours aux énergies fossiles qui ont permis jusqu'ici aux économies modernes de fonctionner et de se développer dans la direction de la croissance du PIB.

<sup>18</sup> Ibid. p107

<sup>19</sup> La calcination du calcaire qui intervient dans le processus de fabrication du clinker (principal constituant du ciment) consiste à transformer du calcaire (carbonate de calcium ou CaCO<sub>3</sub>) en chaux (CaO). Elle entraîne chimiquement la formation de CO<sub>2</sub>. Les émissions non-énergétiques annuelles de CO<sub>2</sub> associées à la production de ciment s'élevaient en 2010 à 1,4 GtCO<sub>2</sub>. Voir le 5<sup>e</sup> rapport d'évaluation du GIEC chap10, p749.

<sup>20</sup> Les émissions annuelles de CO<sub>2</sub> associées aux processus industriels (non-énergétiques) s'élevaient en 2010 à 2,6 GtCO<sub>2</sub>. Voir le 5<sup>e</sup> rapport d'évaluation du GIEC chap10, p.749.

<sup>21</sup> L'énergie primaire est une forme d'énergie disponible dans la nature avant toute transformation.

<sup>22</sup> Voir IEA statistics. Les mix énergétiques des principales économies du monde sont principalement composés d'hydrocarbures (74% dans l'Union européenne, 81% dans les pays de l'OCDE, 88% en Chine, 92% en Inde et 86% aux États-Unis en 2015).

<sup>23</sup> L'économie dite « dématérialisée » est également fortement consommatrice de ressources transformées, et n'est possible que dans un monde très consommateur d'énergie (The Shift Project, 2018).

La croissance des pays « en développement » repose aujourd'hui essentiellement sur l'utilisation d'énergies fossiles, également en croissance par voie de conséquence. Dès lors, la problématique du dérèglement climatique et de la raréfaction de la ressource représente une menace pour leur croissance et pose la question de l'équité à l'accès aux modes de vie « développés », initialement perçus comme une voie de progrès sociétal mais concrètement pas supportables s'ils étaient généralisés à l'échelle planétaire.

#### 4.2.2 Risques de transition et risques physiques

Pour le système économique et ses différents acteurs, les enjeux énergie-climat se manifestent sous la forme de risques de deux natures<sup>24</sup>.

**Les risques de « transition »** recouvrent l'ensemble des risques associés à la restructuration profonde du système économique induite par l'évolution du mix énergétique, lui-même contraint par la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère et par la diminution des stocks de ressources fossiles disponibles<sup>25</sup>. La transition vers un système économique faiblement émetteur de CO<sub>2</sub> implique une transformation profonde du système de **production** et de **consommation d'énergie** (l'appareil industriel et les modes de vie demeurent aujourd'hui dimensionnés sur l'usage des hydrocarbures). Cette transformation devra être rapide (réduction des émissions de gaz à effet de serre de l'ordre de 5 à 10 % par an) pour tenir les objectifs convenus lors de l'Accord de Paris. Elle affectera la plupart des flux physiques (d'énergie, de matières premières, de biens), concernera directement ou indirectement tous les secteurs de l'économie et aura des conséquences sur l'emploi et sur les organisations. À ces aspects qu'il faut prendre en compte dès à présent s'ajoutera la question politique de l'équilibre entre les efforts qui seront demandés aux pays en développement et ceux considérés comme « développés », afin de mettre en œuvre une transition socialement acceptable à l'échelle mondiale.

nation qui puisse démarrer au plus tôt, quitte à la réviser périodiquement. À l'inverse, un plan de réduction des émissions de 5% par an sera caduc s'il n'est mis en œuvre qu'en 2025.

**Les risques « physiques »** sont associés aux conséquences physiques du changement climatique, tels que l'accroissement de la fréquence et de l'intensité des aléas climatiques extrêmes, l'élévation du niveau des mers, certains défis à la santé publique ou encore le bouleversement du débit de fleuves. Ces phénomènes pourraient très significativement perturber le système économique, en particulier les activités de production et les chaînes d'approvisionnement. Les récentes tractations autour de l'ouverture de nouvelles routes maritimes dans l'océan Arctique<sup>26</sup> ou encore la faiblesse du niveau du Rhin à l'automne 2018<sup>27</sup>, sont des exemples de risques (ou d'opportunités) impliquant les flux de matières et de biens. La matérialité de ce risque est l'objet de travaux de plus en plus nombreux et précis – émanant d'instances scientifiques et politiques internationales, ainsi que désormais de secteurs d'activité tels que celui de l'assurance, ou de certaines industries – tant sur les perspectives d'impacts que sur l'adaptation et la résilience des organisations et des institutions (États, entreprises etc.).

Ces risques **se distinguent d'autres types de risques** notamment par les aspects suivants :

1. Leur caractère inédit, et dès lors l'impossibilité d'utiliser des valeurs historiques pour les prévoir et les appréhender voire valider toute modélisation (back-testing) ;
2. Leur ampleur et leur caractère global et irréversible (ces risques affecteront d'une manière plus ou moins directe tous les secteurs de l'économie) ;
3. L'incertitude associée à leur horizon d'occurrence, à leur diffusion et à leur manifestation ;
4. La dépendance (partielle) de leur ampleur compte tenu des actions décidées dès aujourd'hui.

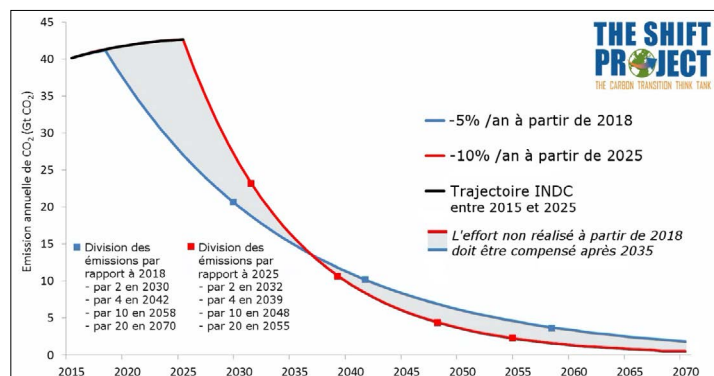


Figure 4- Trajectoires d'émissions mondiales compatibles avec une hausse de température limitée à 2°C. Ces trajectoires théoriques illustrent le coût de l'inaction, et la nécessité de mettre en place une stratégie de décarbo-

#### 4.2.3 Budget carbone

La mobilisation progressive, résultant de la volonté d'atténuer et de gérer le risque climatique, a abouti à la signature de l'Accord de Paris en décembre 2015. Dans le cadre de cet Accord, les pays signataires se sont engagés à agir afin de contenir l'élévation de la température moyenne de la planète bien en-deçà de 2°C et de poursuivre l'action menée pour limiter l'élévation des températures à 1,5°C. **La limitation du réchauffement climatique bien en-deçà des 2°C par rapport à l'époque préindustrielle, est un objectif qui s'est progressivement imposé dans les discussions internationales.**

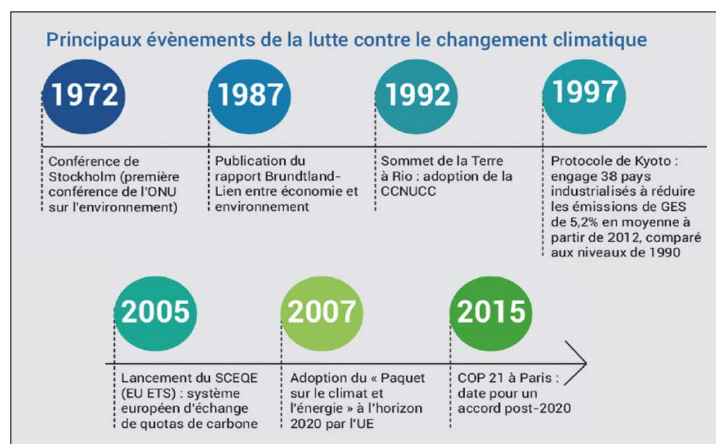
<sup>24</sup> Voir notamment le désormais célèbre discours du Gouverneur de la Banque d'Angleterre Mark Carney au Lloyds de septembre 2015.

<sup>25</sup> Voir notamment l'étude du Shift Project de juin 2020: « L'union européenne risque de subir des contraintes fortes sur les approvisionnements pétroliers d'ici à 2030 » (<https://theshiftproject.org/article/ue-declin-approvisionnement-petrole-2030-etude/>)

<sup>26</sup> « Estimation de l'impact des nouvelles routes polaires sur la géographie du commerce mondial » CEPII (oct. 2018).

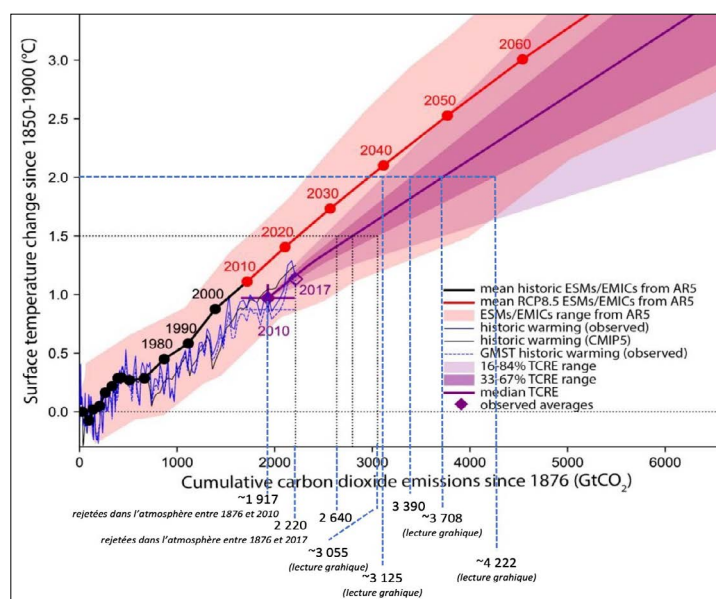
<sup>27</sup> « Les niveaux d'eau du Rhin deviennent « critiques » pour la navigation et l'industrie ». L'Alsace (31/10/2018). La faible navigabilité du Rhin serait en partie à l'origine du ralentissement économique en Allemagne. Voir « Europe's mightiest river is drying up, most likely causing a recession in Germany. Yes, really. », Business Insider France (22/01/2019).

Compte tenu de la forte relation qui lie le taux de concentration de GES dans l'atmosphère et l'élévation de la température moyenne, la fixation d'une telle limite de réchauffement implique, par construction, l'allocation d'un « budget carbone ». Il s'agit de la quantité totale de GES qu'il est possible d'émettre pour maintenir leur concentration dans l'atmosphère en-deçà d'un certain taux correspondant à la limite de réchauffement visée.



**Figure 5 - Principaux événements passés de la lutte contre le changement climatique**

Les experts du GIEC ont établi, dans le rapport spécial 1.5°C (SR15) publié en 2018<sup>28</sup>, des budgets carbone disponibles entre 2018 et 2100 selon les températures visées et les plages d'incertitudes. Ils se retrouvent sur ce graphique sur lequel nous avons ajouté quelques éléments de lecture :



**Figure 6 - Budgets carbone, cibles température et incertitudes**  
[Source : GIEC SR15, chapitre 2]

Ce graphique permet donc de déduire des budgets carbone disponibles à partir de 2018 selon des niveaux de risques comme suit :

| Élévation de température en 2100 par rapport au niveau préindustriel | Probabilité de rester en dessous de ce niveau | Budget carbone disponible à partir de 1876 (GtCO <sub>2</sub> ) | Budget carbone disponible entre 2018 et 2100 (GtCO <sub>2</sub> ) | Année d'épuisement du budget si les émissions sont stabilisées au niveau de 2018 |
|----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| +1,5 °C                                                              | 67%                                           | 2 640                                                           | 420                                                               | 2028                                                                             |
| +1,5 °C                                                              | 33%                                           | 3 055                                                           | 835                                                               | 2038                                                                             |
| +2 °C                                                                | 84%                                           | 3 125                                                           | 905                                                               | 2040                                                                             |
| +2 °C                                                                | 67%                                           | 3 390                                                           | 1 170                                                             | 2046                                                                             |
| +2 °C                                                                | 50%                                           | 3 708                                                           | 1 488                                                             | 2053                                                                             |
| +2 °C                                                                | 33%                                           | 4 222                                                           | 2 002                                                             | 2066                                                                             |

**Tableau 2 - Budgets Carbone Monde selon les cibles climatiques**

L'Accord de Paris n'est pas formulé explicitement en budget carbone. Néanmoins la phrase suivante de la résolution des Accords de Paris peut s'éclairer à la lumière du graphique ci-dessus : « *Insistant avec une vive préoccupation sur l'urgence de combler l'écart significatif entre l'effet global des engagements d'atténuation pris par les Parties en termes d'émissions annuelles mondiales de gaz à effet de serre jusqu'à 2020 et les profils d'évolution des émissions globales compatibles avec la perspective de contenir l'élévation de la température moyenne de la planète nettement en dessous de 2 °C par rapport aux niveaux préindustriels et de poursuivre l'action menée pour limiter l'élévation des températures à 1,5 °C* »<sup>29</sup>.

Le scénario RCP 2.6 du GIEC est celui qui semble respecter au mieux les accords de Paris. Dans ce scénario (budget disponible de 550 à 1 300 GtCO<sub>2</sub> à partir de 2011), rester en dessous de « +1,5°C » était qualifié en 2014 par le GIEC<sup>30</sup> de « plus improbable que probable », et rester en dessous de « +2°C » était qualifié de probable. En ramenant à 2018 à l'aide du graphique ci-dessus, ce scénario correspond à un budget disponible en 2018 allant de 803 à 1 603 GtCO<sub>2</sub>.

On pourrait raisonnablement considérer qu'une trajectoire qui met tout en œuvre pour respecter les Accords de Paris vise les « 84% de chance de rester en dessous de +2°C » ou les « 67% de chance de rester en dessous de +1,5°C ». Néanmoins, **la grande majorité des publications scientifiques prennent à ce jour en objectif climatique de référence celui de rester en dessous des +2°C avec une probabilité de 67%, ce qui correspond donc à un budget restant en 2018 de 1 170 GtCO<sub>2</sub>**. Ce budget est bien compatible avec le scénario RCP 2.6 du GIEC (fourchette haute). Ce sont donc cet objectif et ce budget qui seront également pris en référence dans ce rapport.

En 2018, les émissions mondiales annuelles étaient de 42,1 GtCO<sub>2</sub> (avec AFOLU)<sup>31</sup>. Viser un budget de 1 170 GtCO<sub>2</sub> à partir de 2018 (67% de chance de rester sous les +2°C, moins de 20% de chance de rester sous les +1,5°C) et à horizon 2100,

<sup>28</sup> Voir chapitre 2 (table 2.2) du « Rapport spécial 1.5°C », GIEC (2018) <https://www.ipcc.ch/sr15/chapter/chapter-2/>. Ce budget ne couvre que les émissions de CO<sub>2</sub> énergétiques et non-énergétiques, mais son calcul tient compte des émissions des autres GES (principalement méthane et protoxyde d'azote). Voir section 2.2.2.2. p106. Les auteurs précisent que de nombreuses incertitudes sur sa valeur (qui s'élèvent à plusieurs centaines de GtCO<sub>2</sub>) demeurent.

<sup>29</sup> <https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/fre/109f.pdf>

<sup>30</sup> [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WGIIIAR5\\_SPM\\_TS\\_Volume\\_fr-1.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WGIIIAR5_SPM_TS_Volume_fr-1.pdf)

<sup>31</sup> [https://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget/archive/2019/GCP\\_CarbonBudget\\_2019.pdf](https://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget/archive/2019/GCP_CarbonBudget_2019.pdf)

c'est diminuer de 3,39%<sup>32</sup> tous les ans ses émissions. C'est un budget que nous pouvons considérer comme « maximum » permettant de dire que l'on respecte les accords de Paris.

À noter que pour respecter le budget de 905 GtCO<sub>2</sub> et ainsi augmenter nos chances de rester sous les « +2 °C » à 84%, il faudrait diminuer nos émissions d'environ 4,55% par an à partir de 2018.

À noter également, les 1 170 GtCO<sub>2</sub> restants entre 2018 et 2100 correspondent à ~34% du budget total de 3 390 GtCO<sub>2</sub> démarrant en 1876.

Il est bien entendu que ces objectifs s'entendent à l'échelle planétaire et ne sont pas applicables de la même façon selon les zones géographiques ou selon les secteurs d'activité. Les niveaux d'efforts à réaliser entre les pays ont été l'objet d'après négociations lors de la COP21, même s'ils ne sont pas formulés en budget carbone. En tout état de cause et en l'état des connaissances scientifiques, quelle que soit la répartition des efforts (par pays, par secteur d'activité, ...), l'enveloppe carbone globale n'est pas négociable. C'est-à-dire que si l'une des parties émet plus que prévu, d'autres devront compenser cette surconsommation du budget carbone en intensifiant leurs efforts.

#### 4.2.4 La transition bas-carbone pourrait être désordonnée et incertaine

**La lutte contre le réchauffement climatique se heurte à la « tragédie des horizons »<sup>33</sup>.** La matérialité des risques énergie-climat n'est pas encore suffisamment perçue par les acteurs économiques, qui se trouvent confrontés au classique dilemme du prisonnier<sup>34</sup>. Cela conduit à retarder l'action favorisant ainsi l'émergence de politiques de réduction d'émissions de GES plus brutales ou radicales à l'avenir (pour compenser le retard).

**La réduction de la consommation d'hydrocarbures implique des transformations très lourdes** (usage de l'énergie, système productif, aménagement du territoire, etc.). Le système économique actuel s'est construit sur l'abondance d'hydrocarbures, ce qui entraîne de facto un grand nombre de « dépendances organisationnelles » qui pourraient nécessiter un considérable engagement de la puissance publique pour être levées. Ces dépendances pourraient globalement retarder l'action, et par ailleurs générer des réactions sociales fortes.

**La réduction de la consommation de ressources, énergétiques et non-énergétiques, pourrait également se faire de manière chaotique.** L'approvisionnement en hydrocarbures

est contraint par la disponibilité géologique et la capacité technico-économique à l'exploitation des gisements<sup>35</sup>. L'approvisionnement en matières premières, et notamment en métaux (cuivre, lithium, nickel, cobalt, etc.) est également contraint à terme (Hache, 2019). Les bouleversements induits par les pertes de biodiversité ou d'autres impacts environnementaux (phénomènes météorologiques extrêmes, sécheresses, crues, ...), et les mesures prises pour y faire face, génèrent une complexité et une incertitude supplémentaire.

**La dynamique du changement climatique est complexe et sa modélisation demeure marquée par des incertitudes importantes.** Si les nombreux travaux des chercheurs du GIEC permettent d'estimer comment le changement climatique pourrait affecter les écosystèmes naturels et humains (groupe de travail n°1 et 2), de telles estimations sont sujettes à des incertitudes (notamment en ce qui concerne la localisation, l'ampleur ou encore la fréquence de ces changements), ce qui complexifie la réalisation de prévisions des manifestations physiques du changement climatique<sup>36</sup> (Hallegatte, 2009).

Par ailleurs, les conséquences de ces manifestations (et leur diffusion), notamment socio-économiques, sont également difficilement prévisibles. La faillite soudaine de PG&E après les incendies en Californie en 2017 et 2018 est un exemple parmi d'autres<sup>37</sup>.

**La pandémie de Covid-19 nous rappelle que d'autres incertitudes existent, et que certaines peuvent être accentuées par les dégradations environnementales.** S'il n'y a pas de lien de causalité directe établi entre le changement climatique et la pandémie de Covid-19, la hausse de température de l'atmosphère et des océans couplée à la modification de nos écosystèmes, induite par ou à l'origine du changement climatique (déforestation, désertification, fonte du pergélisol, acidification des océans, ...), constituent un terrain favorable à l'augmentation de la fréquence, de l'intensité et/ou de la durée d'événements météorologiques, sanitaires, alimentaires ou sociaux. Ces événements vont

35 Fondamentalement, l'extraction d'une matière disponible en quantité finie passe toujours par un maximum, après-quoi la quantité extraite chaque année se stabilise et/ou décroît. Les hydrocarbures, à commencer par le pétrole, n'échappent pas à la règle. En 2018, le rapport annuel de l'Agence internationale de l'énergie (AIE), le World Energy Outlook (WEO), alertait : « The risk of a supply crunch looms largest in oil. The average level of new conventional crude projects approvals over the last three years is only half the amount necessary to balance the market out to 2025, given the demand outlook in the New Policies Scenario. US tight oil is unlikely to pick up the slack on its own. Our projections already incorporate a doubling in US tight oil from today to 2025, but it would need more than triple to offset a continued absence of new conventional projects » (AIE (Agence Internationale de l'énergie), 2019). En 2019, des chercheurs de l'IFPEN confirment ce risque : « La probabilité d'un oil crunch est loin d'être nulle » (Hacquard, 2019). Que ce soit d'ici 2025 ou plus tard, la capacité d'approvisionnement du système économique est contrainte, à terme.

36 Dans les rapports d'évaluation publiés par le GIEC, les rédacteurs adjoignent leurs conclusions de formulation du type « medium evidence » ou « high confidence » etc. Voir par exemple le rapport spécial 1.5°C (2018).

37 PG&E Corp, propriétaire de la plus importante compagnie électrique des États-Unis par le nombre de clients, s'est déclarée en faillite en janvier 2019, écrasée par fardeau financier de feux de forêt en 2017 et 2018. Le titre de PG&E était considérée « investissable » par les agences de notation financière jusqu'en novembre 2018, date à partir de laquelle la note de crédit de l'entreprise a été rapidement dégradé jusqu'à son dépôt de bilan. Voir par exemple le site web de Moody's.

32 Dans le modèle d'une trajectoire en décroissance annuelle constante. Voir Note de Calcul

33 Cette expression caractérise le décalage entre l'horizon d'occurrence perçu des risques climat et l'horizon de gestion des organisations, notamment financières. Elle est évoquée par Mark Carney, Gouverneur de la Banque d'Angleterre, dans un discours prononcé au Lloyds de Londres en 2015.

34 Tant que le coût des externalités reste bas, un acteur peut même se causer un « désavantage compétitif » en étant « vertueux trop tôt » par rapport à ses concurrents.

des canicules aux conflits armés en passant par les incendies, les crues, les cyclones, les épidémies, les révoltes, les crises migratoires etc.<sup>38</sup>. Lorsqu'une crise survient, la priorité va naturellement à la gestion de l'urgence, la préservation de la vie et de la santé humaine, la réparation des dégâts matériels directs puis au rétablissement de l'économie à court terme. La gestion de crise interrompt au moins à court terme les trajectoires de transformation qui ajoutent une part de risque, d'inconnu et d'effort supplémentaire à la situation déjà difficile. À moyen terme, si les phases de reconstruction permettent de tirer les leçons de la crise et ouvrent des opportunités de changement, la tentation est grande de retrouver la situation à l'identique avant de poursuivre le changement. Ainsi, la multiplication des crises de toute nature, à la faveur d'un terrain propice amené par le changement climatique, pourrait freiner fortement la mise en œuvre de la transformation nécessaire à la limitation du changement climatique. Saisir les opportunités de changement en profondeur, amenées par les phases de rétablissement, de relance, est donc plus que jamais nécessaire afin de sortir de ce cercle vicieux. Pour cela, le rôle de la puissance publique est fondamental. Elle doit définir et flécher les trajectoires de reprises, aider les agents économiques fragilisés à la suivre en veillant à l'acceptabilité sociale de la répartition de l'effort.

**L'environnement commercial et géopolitique est en plein bouleversement.** Le contexte de guerre tarifaire affectant le commerce international<sup>39</sup> (inimaginable il y a encore trois ans malgré les difficultés qui affectent l'OMC), le Brexit et l'orientation de la politique étrangère de plusieurs États (beaucoup moins « multilatérale ») sont autant d'éléments qui pourraient entraver la coopération internationale sur le sujet climat et introduire encore davantage d'incertitudes. La potentielle instauration de taxes carbone aux frontières<sup>40</sup>, mais aussi les difficultés rencontrées par les gouvernements pour instaurer un signal prix carbone croissant (notamment en France avec l'arrêt du gouvernement sur la poursuite de l'augmentation de la taxe carbone), semblent pointer dans le sens d'un recours croissant des États à des mécanismes de réglementation établis potentiellement de façon brutale et de manière non-coordonnée avec leurs partenaires<sup>41</sup>.

#### 4.2.5 La meilleure façon de limiter ces risques : commencer tout de suite

La concentration des GES (dioxyde de carbone, méthane, ...) dans l'atmosphère définit leur pouvoir réchauffant. En tenant compte des temps d'activité dans l'atmosphère (par exemple quelques siècles pour que la majeure partie du CO<sub>2</sub> soit absorbée par les océans, quelques centaines de milliers d'années pour qu'il disparaisse complètement de l'atmosphère<sup>42</sup>) et du pouvoir réchauffant de chaque GES par comparaison au CO<sub>2</sub>, on peut définir ainsi un « Budget carbone » qui correspond à la quantité de GES (en tonne d'équivalent CO<sub>2</sub>, tCO<sub>2</sub>eq) que l'on peut encore émettre tout en restant en deçà d'une limite définie par le GIEC et permettant de maximiser les chances de rester sous la barre des 2°C.

**Plus nous commençons à réduire tôt nos émissions de GES, plus la transformation des activités pourra se faire progressivement.** Plus nous attendons, plus les ruptures à venir seront violentes. Cette caractéristique couplée au risque de crises décrit ci-dessus devraient nous inciter à fixer un budget carbone et mettre en place des mesures de réduction à court, moyen et long terme, permettant de diminuer le plus progressivement possible les émissions dans le respect du budget. La mise en œuvre des mesures court terme, les plus « faciles » et les moins structurelles, permettant de laisser plus de temps aux transformations plus profondes et plus risquées, nécessitant plus de préparation, de recherche, d'organisation, et de négociations.

Les Accords de Paris n'ont pas défini l'allocation d'un budget carbone par pays. En revanche, chaque pays contributeur est engagé, de manière non contraignante, à définir une stratégie, des objectifs et une feuille de route de réduction de ses émissions de GES, à la transparence sur ses mesures et ses actions présentées à chaque COP.

Il est à noter qu'à ce jour, les objectifs présentés par les pays n'est pas compatible avec les objectifs globaux de réduction des GES définis dans les Accords de Paris par la COP21 et visant à contenir le réchauffement climatique en dessous des 2°C par rapport à l'époque préindustrielle. Dit autrement, les objectifs fixés par les pays ne permettraient pas de « (...) parvenir au plafonnement mondial des émissions de gaz à effet de serre dans les meilleurs délais, étant entendu que le plafonnement prendra davantage de temps pour les pays en développement (...), et à opérer des réductions rapidement par la suite conformément aux meilleures données scientifiques disponibles de façon à parvenir à un équilibre entre les émissions anthropiques par les sources et les absorptions anthropiques par les puits de gaz à effet de serre au cours de la deuxième moitié du siècle, sur la base de l'équité, et dans le contexte du développement durable et de la lutte contre la pauvreté. »<sup>43</sup>

38 Ces risques et leur lien de causalité avec le changement climatique sont documentés par le GIEC (AR 15 §2) : [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR\\_AR5\\_FINAL\\_full.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full.pdf)

39 Voir « Avis de tempête sur le commerce international : quelle stratégie pour l'Europe », Conseil d'analyse économique (2018)

40 Voir « Initiative pour l'Europe - Discours d'Emmanuel Macron pour une Europe souveraine, unie, démocratique. » (septembre 2017). Voir également « How to design carbon taxes », The Economist (18/08/2018). La proposition est désormais portée par la Présidente de la Commission européenne Ursula von der Leyen.

41 Voir également « The material scenario of potential carbon border taxes », Beyond ratings (juillet 2019) : « To put it simply, the development of carbon border tariffs is a scenario to consider in the fundamental analysis of sovereign and corporate assets. It is, of course, uncertain (as illustrated for example by the recent trade deal between the EU and Mercosur), but it deserves attention as its impacts could be significant for investors. If climate issues are more integrated in trade in the future, there will unavoidably be losers and winners. Such changes could be more or less progressive or non-linear, strong or moderate, but they would be meaningful. »

42 Colbourn et al. The time scale of the silicate weathering negative feedback on atmospheric CO<sub>2</sub> », Global Biogeochemical Cycles, vol. 29, no 5, 2015

43 Rapport de la Conférence des Parties sur sa vingt et unième session, tenue à Paris du 30 novembre au 13 décembre 2015, (COP21, Article 4, Point 1) (<http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/fre/10a01f.pdf>)

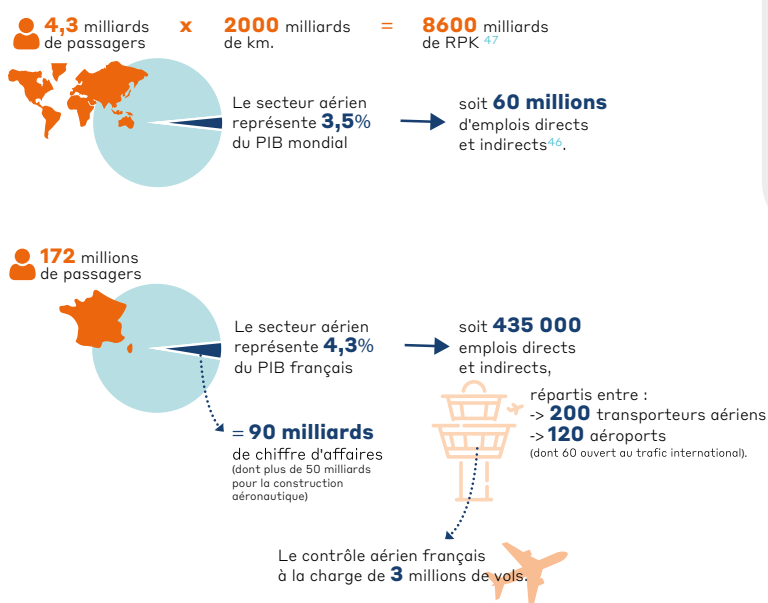
L'engagement de la France en réponse aux Accords de Paris se traduit par la Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC)<sup>44</sup>. La SNBC fixe un budget carbone et une trajectoire qui vise la neutralité carbone des émissions territoriales françaises en 2050, c'est-à-dire passer de 445 MtCO<sub>2</sub>eq en 2018 à 80 MtCO<sub>2</sub>eq en 2050 d'émissions absorbées par les puits de carbone (forêts, captures artificielles, ...). Dans ce périmètre, la part du transport passe de 137 MtCO<sub>2</sub>eq à environ 4 MtCO<sub>2</sub>eq. Malheureusement, le périmètre transport ainsi chiffré exclut les émissions liées au transport international, alors qu'elles

représentent 80% en ce qui concerne le transport aérien. La SNBC intègre le transport aérien international dans la partie « Réduction de l'empreinte carbone des français », qui inclut donc l'ensemble de biens et services importés consommés par les français ainsi que le transport international. L'empreinte carbone moyenne en France est de 11,2 tCO<sub>2</sub>eq par habitant en 2018, contre 6,2 tCO<sub>2</sub>eq pour les émissions territoriales par habitant, ce qui démontre le poids important de l'importation et du transport international pour la France. À noter que la contribution des transports dans l'empreinte carbone est à peu près similaire à celle des émissions territoriales (environ 30%). **Si elle ne l'a pas omise, la SNBC ne fixe pas d'objectif chiffré pour la réduction de l'empreinte carbone.**

44 La SNBC est accessible ici : <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/strategie-nationale-bas-carbone-snbc>

## 5 Situation du secteur aérien aujourd'hui

### La situation de l'emploi dans le secteur aérien (en 2018 dans le monde et en France)



### En comparaison, en 2019, Airbus c'est :

55 milliards de chiffre d'affaires pour 863 avions livrés.

Un carnet de commandes qui représente 412 milliards d'euros

On peut comparer ce chiffre aux exportations françaises :  
-> 508 milliards de biens  
-> 251 milliards de services

Balance commerciale : 31 milliards d'euros

VS

Balance commerciale : -59 milliards d'euros

## 5.2 Bassins d'emplois en France

L'ensemble des activités industrielles aéronautiques et spatiales en France totalisent environ **200 000 emplois directs** selon le GIFAS<sup>45</sup> et **150 000 emplois indirects**<sup>46</sup>. La France dispose d'une industrie couvrant tous les secteurs du marché (avionneurs, motoristes, équipementiers) et recrutant sur l'ensemble du territoire national à travers les chaînes de sous-traitance<sup>47</sup>. Le secteur est formé d'un tissu de 376 entreprises dont 176 PME, installées principalement dans le

sud-ouest<sup>48</sup>. Il s'agit d'un salariat très qualifié, travaillant dans les plus hautes normes de qualité, employant beaucoup d'ingénieurs français, capable d'innovation et de création de valeur économique importante.

À noter que depuis 1990, l'industrie française a perdu dans son ensemble 1,5 millions d'emplois, tandis que l'activité aéronautique en a créé. Au niveau mondial, le nombre d'avions livrés chaque année a été multiplié par 4 sur la même période. Aujourd'hui, le secteur représente plus de 35% de l'activité manufacturière française<sup>49</sup>.

45 GIFAS, rapport annuel 2018-2019. [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)

46 <https://www.helloworkplace.fr/emploi-aeronautique/>

47 Airbus compte ainsi 12 000 sous-traitants.

48 Sans oublier un bassin d'emploi de très forte tradition aéronautique en Pays de Loire !

49 Focus sur l'emploi dans l'industrie française, IFRAP, mars 2019

Du côté du transport, l'activité compte **85 000 emplois directs** dont 75% pour le transport de passagers<sup>50</sup>. Les effectifs de la branche sont en baisse de près de 8% sur la période 2010-2018, soit environ -1% par an. Si on observe les évolutions d'effectifs par code NAF<sup>51</sup>, seul le transport aérien de fret (qui représente 5% des effectifs) est en croissance sur la période.

## 5.3 Missions

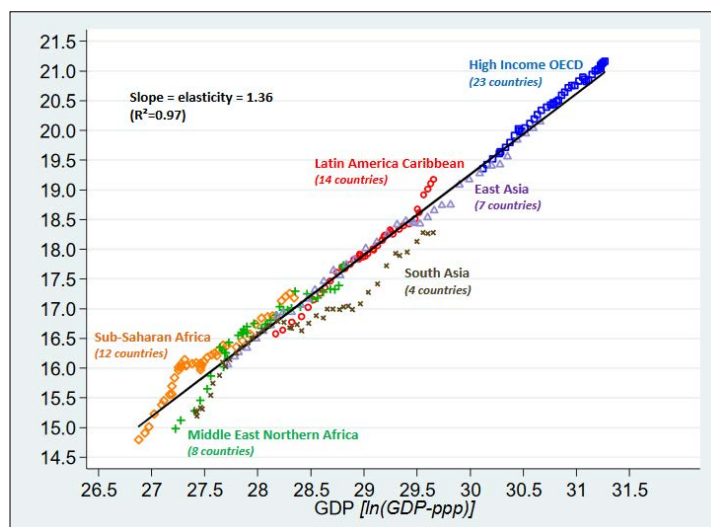
**À quoi sert l'avion ?** Outre les usages militaires, sécuritaires (par exemple les Canadair), sanitaires (typiquement le rapatriement) et diplomatiques, l'avion joue un rôle important dans le désenclavement des territoires et l'animation des échanges nationaux et internationaux, qu'ils soient de nature commerciale ou touristique.

**L'aviation participe ainsi au positionnement de la France comme première destination touristique mondiale.** Notre pays a accueilli 89,4 millions de visiteurs en 2018<sup>52</sup>, et visait avant la crise du COVID le cap des 100 millions à l'horizon 2020, sachant que le tourisme représente, au total, plus de 7% du PIB national. En 2018, les visiteurs internationaux ont généré 56,2 milliards de recettes (+5 %), là encore à un niveau historique.

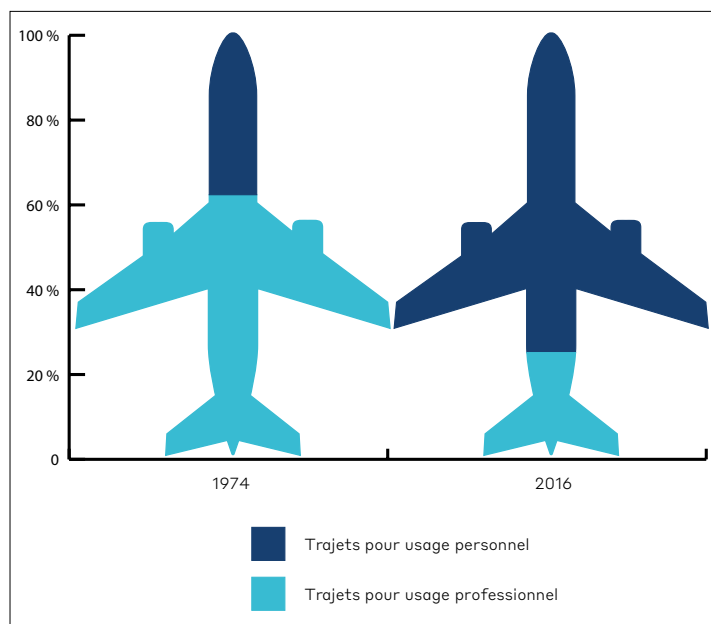
Un récent rapport d'information du Sénat sur la *Contribution du transport aérien au désenclavement et à la cohésion des territoires*<sup>53</sup> souligne **l'importance des dessertes périphériques**. À titre d'exemple, la ligne Quimper-Paris y est ainsi identifiée comme essentielle au tissu économique local du Finistère Sud, et les retombées économiques des liaisons Dublin-Rodez et Charleroi-Rodez y sont chiffrées à 2,14 millions d'euros pour le territoire aveyronnais.

S'appuyant sur les travaux de recherche d'économistes spécialistes du transport aérien, le même rapport met en lumière la corrélation entre la croissance du trafic aérien d'une part, celle du PIB, du niveau de salaire, des investissements directs à l'étranger et de la démographie locale d'autre part. **Des boucles de rétroaction positives entre croissance économique et croissance du secteur aérien y sont identifiées**<sup>54</sup>, dont le sens de causalité est lié à la typologie des régions concernées. Si dans les régions centrales, c'est la croissance économique qui attire le transport aérien, la stimulation agit dans le sens opposé pour les régions périphériques : c'est le transport aérien qui stimule l'économie locale<sup>55</sup>. « *Le trafic n'y est pas induit, mais il est moteur et porteur d'externalités posi-*

*tives pour l'économie locale.* » Il s'agit d'un argument important pour le désenclavement économique de nos régions, puisque le développement du secteur aérien semble être un levier d'action direct justifiant le recours aux subventions publiques dans la politique d'aménagement des territoires.



## 5.4 Usages et clientèle



Une enquête réalisée en 2015-2016 par la DGAC<sup>56</sup> met en lumière une inversion des usages en France en 40 ans : alors qu'en 1974, 62% des usagers prenaient l'avion pour des raisons professionnelles contre 38% pour des usages privés, ces derniers représentent en 2016 72% des vols, dont 48% pour des activités de loisirs, le trafic affinitaire (visites à la famille) comptant lui pour 25% des vols<sup>57</sup>.

50 F NAM, rapport de branche 2019. <https://www.fnam.fr/files/download/52ad76e1f84ae6b>

51 Nomenclature d'activités française. <https://www.insee.fr/fr/information/2406147>

52 <https://www.lesechos.fr/industrie-services/tourisme-transport/la-france-reste-la-premiere-destination-touristique-mondiale-1021925#:~:text=La%20France%20demeure%20la%20premi%C3%A8re,d%C3%A9tablier%20un%20nouveau%20record>

53 <http://www.senat.fr/rap/r18-734/r18-7344.html>

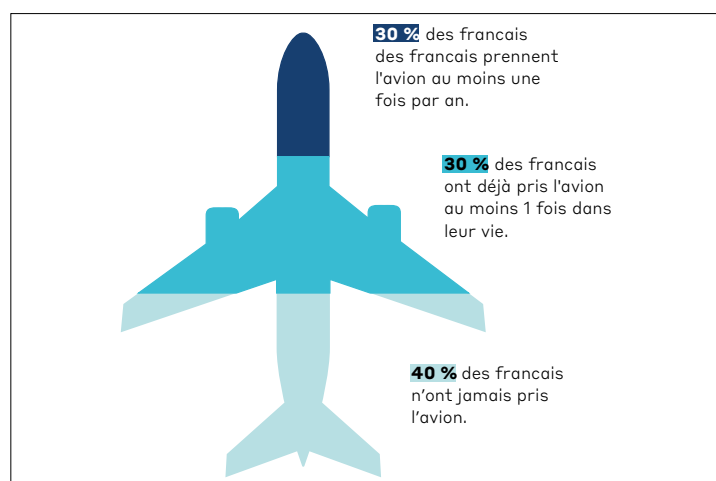
54 E. Van De Vijver, B. Derudder, F. Witlox, « Air passenger transport and regional development: Cause and effect in Europe », Promet - Traffic & Transportation, 2016.

55 K. Makkala, H. Tervo, « Air transportation and regional growth: which way does the causality run? », Environment and Planning A, vol. n°45, 2013.

56 [https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/ENPA\\_2015\\_2016.pdf](https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/ENPA_2015_2016.pdf)

57 Selon une étude récente d'AMADEUS, menée sur un panel de voyageurs internationaux, rendre visite à sa famille et ses amis serait un motif premier pour 52 % des répondants prévoyant de réserver un voyage d'agrément après la levée des restrictions de déplacement dus à la crise sanitaire du COVID-19. <https://amadeus.com/documents/en/retail-travel-agencies/info-graphics/destinationx-where-next-travel-planning-1-infographic.pdf>

La même enquête révèle par ailleurs que **les cadres supérieurs français volent 17 fois plus que leurs compatriotes ouvriers**, alors que ces derniers sont plus représentés dans la population (12,1%) que les premiers (9,4%). Comme le rappelle une publication récente du GIFAS<sup>58</sup>, 40% des Français n'ont jamais pris l'avion, et seuls 30% le prennent une fois par an ou plus, et d'après les statistiques ministérielles<sup>59</sup>, la moitié des déplacements par avion des Français est le fait des 2% dont les revenus par unité de consommation sont les plus élevés. En France toujours, les 5% des personnes qui voyagent le plus émettent 50% des émissions de gaz à effet de serre en lien avec le transport. Ce groupe comporte une très forte surreprésentation des personnes dont les revenus dépassent 7 500€/mois



Cette polarisation de l'usage de l'avion vers les catégories socio-professionnelles les plus élevées n'est pas une exception française. Aujourd'hui, environ la moitié des habitants de pays riches et développés ne prennent jamais l'avion. Si ce mode de transport se développe auprès de tous les segments de population, il demeure l'apanage des plus aisés : au Royaume-Uni et aux États-Unis par exemple, entre 12% et 15% des personnes réalisent entre 65% et 70% des vols<sup>60</sup>. Au Royaume-Uni toujours, 75% des vols de tourisme sont empruntés par les CSP les plus élevées<sup>61</sup>. Ces disparités se généralisent également à grande échelle, comme le montre très clairement le graphique ci-dessous tiré d'une étude récente consacrée aux pays émergents :

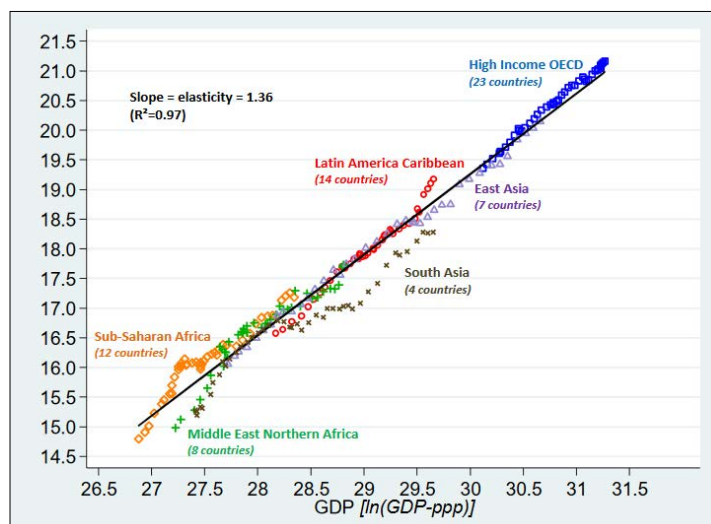


Figure 7 - Source du graphique : <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-01305412/document>, François Bourguignon, Pierre-Emmanuel Darpeix, Air traffic and economic growth: the case of developing countries (2016)

Il est enfin estimé que seule 10% de la population mondiale prend au moins une fois l'avion chaque année<sup>62</sup> et selon le CEO de Boeing lui-même, 80% de la population mondiale n'a jamais volé<sup>63</sup>. L'aérien n'échappe donc pas plus que n'importe quel autre mode de transport au modèle de Schäfer<sup>64</sup>, selon lequel il existe une forte corrélation entre la distance moyenne parcourue et le niveau de revenus.

L'explication de ces disparités réside dans le fait que les déplacements longue distance sont limités en partie par le coût du transport aérien, même s'il est aujourd'hui très bas, mais aussi par le coût de l'hébergement et des activités sur place et par la possibilité de disposer de temps libre à consacrer à des voyages. Ainsi **la diminution du prix du transport aérien n'a ouvert que très peu, en pratique, les voyages aux catégories sociales modestes ; mais elle a permis aux catégories aisées de multiplier les voyages de courte durée**, pour les loisirs comme pour les affaires. Pour un voyageur sur quatre, le low-cost est certes une nécessité face à un budget vacances qui se réduit. Les autres, en revanche, privilégient les voyages à bas coût pour profiter davantage des loisirs sur place, mais aussi pour partir plus souvent et plus loin<sup>65</sup>.

En conséquence, au niveau mondial, en 2018, 1 % de la population était responsable de 50 % des émissions de GES de l'aviation<sup>66</sup>, avec un groupe de voyageurs fréquents parcourant environ 56 000 km en avion par an.

58 [https://res.cloudinary.com/gifas/image/upload/v1582625311/Documents/GIFAS\\_DOC\\_VRAI\\_FAUX\\_bd\\_pap\\_rotzzf.pdf](https://res.cloudinary.com/gifas/image/upload/v1582625311/Documents/GIFAS_DOC_VRAI_FAUX_bd_pap_rotzzf.pdf)

59 <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/enquete-nationale-transports-et-deplacements-entd-2008>

60 <https://www.nytimes.com/interactive/2019/10/17/climate/flying-shame-emissions.html>.

61 Hopkinson, L., Sloman, L., Newson, C., & Hiblin, B. (2019). Curbing aviation with a Frequent Flyer Levy and aviation fuel duty – a fair tax package.

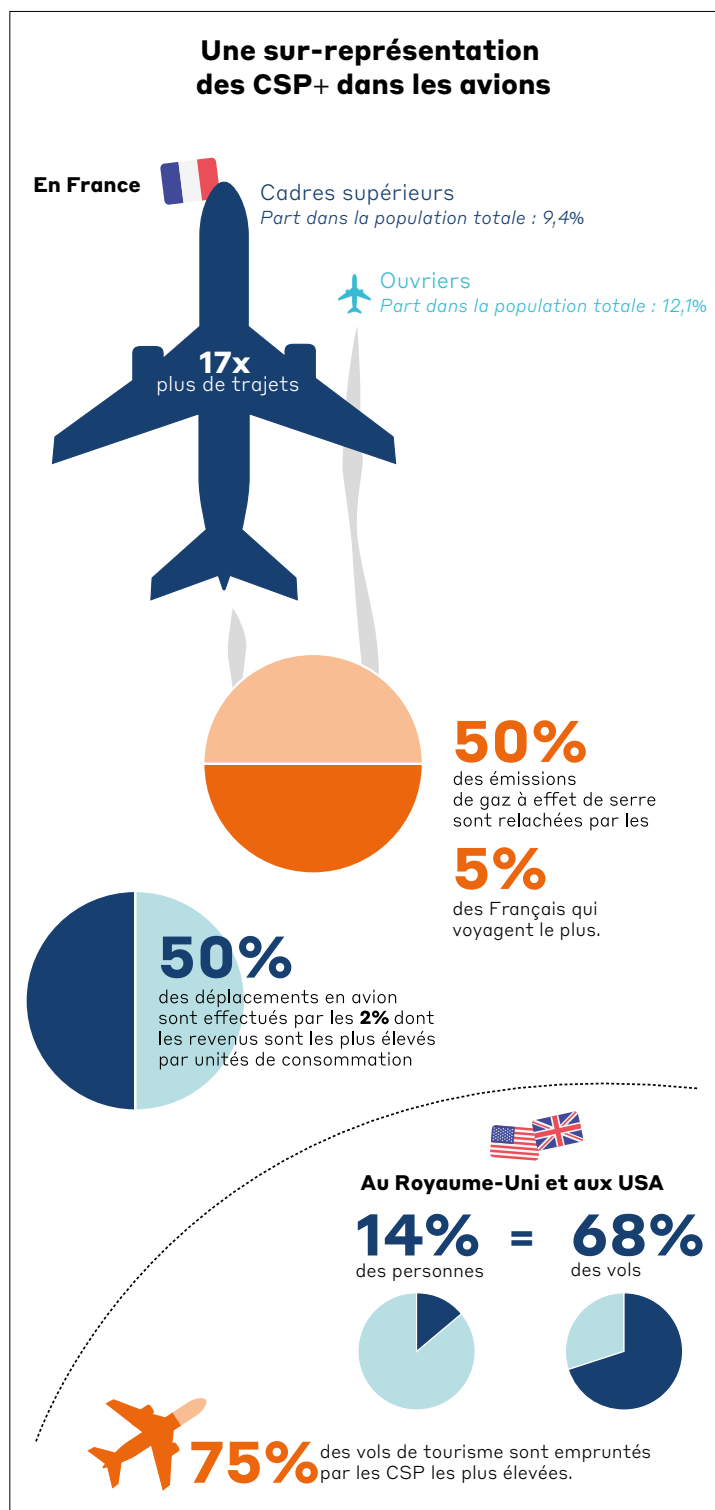
62 [https://www.lemonde.fr/idees/article/2011/11/01/7-milliards-en-avion\\_1596821\\_3232.html](https://www.lemonde.fr/idees/article/2011/11/01/7-milliards-en-avion_1596821_3232.html)

63 <https://www.cnbc.com/2017/12/07/boeing-ceo-80-percent-of-people-never-flown-for-us-that-means-growth.html>

64 SCHÄFER A., HEYWOOD J., JACOBY H., WAITZ I., 2009, Transportation in a Climate-Constrained World, Cambridge (Ma.), MIT Press, 329 p.

65 <https://www.lefigaro.fr/conso/2015/01/28/05007-20150128ART-FIG00138-portrait-du-voyageur-low-cost-en-cinq-chiffres.php>

66 The Guardian, 1% of people cause half of global aviation emissions – study, 2020. <https://www.theguardian.com/business/2020/nov/17/people-cause-global-aviation-emissions-study-covid-19>



L'usage de l'avion est enfin à resituer par rapport à l'ensemble du secteur des transports. Aux États-Unis, la distance moyenne parcourue par habitant était en l'an 2000 d'environ 80 km par jour dont 10 km en avion<sup>67</sup>, la voiture pourvoyant à l'essentiel de la demande de transport.

En France, la voiture reste le moyen de transport permettant de réaliser 80% des 38 km par jour (soit 14 000 km par an) parcourus par chacun de nos concitoyens. L'avion y est fortement minoritaire (moins de 5% des kilomètres parcourus dans le trans-

port intérieur<sup>68</sup>) mais sa part dans les voyages longue distance ne cesse de croître, passant de 8,0 % en 2009 à 9,5 % en 2016. L'avion est principalement utilisé pour des voyages à plus de 1 000 km, et les distances parcourues lors de ces voyages augmentent de 5 %, passant de 97 à 102 milliards de km entre 2015 et 2016<sup>69</sup>.

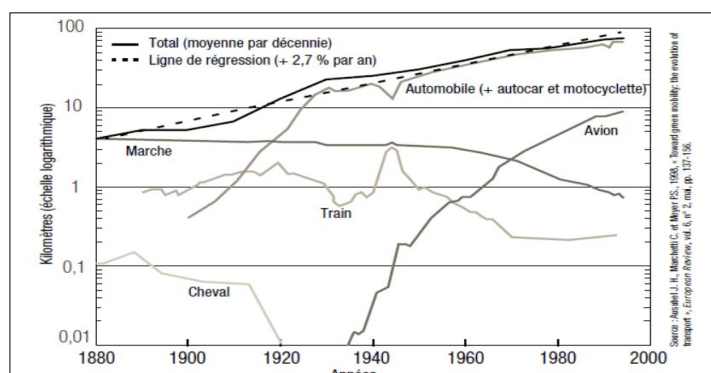


Figure 8- Source : AUSUBEL J.H., C. MARCHETTI, P.S. MEYER, (1998), *Toward green mobility: the evolution of transport*, European Review, Vol. 6, N. 2, pp.137-156.

## 5.5 Les progrès techniques : Où en sommes-nous ?

**La recherche permanente de l'efficacité énergétique fait partie de l'ADN de l'aéronautique.** Nombreux sont les acteurs du secteur qui dénoncent la tentation d'« aviation-bashing », rappelant à leurs détracteurs que l'aviation a été et continue d'être un secteur d'innovation technologique, et que si elle émet des gaz à effet de serre, elle peut compter sur une industrie de pointe et sur l'inventivité de ses ingénieurs pour actionner les leviers de sa décarbonation. Qu'en est-il exactement ? Quelles perspectives nous offre encore le progrès technique ?

### 5.5.1 Avions et moteurs

Initié dans les années 50, le passage des avions à hélices aux turboréacteurs a permis de gagner en vitesse au prix d'une forte augmentation (jusqu'à un doublement) de la consommation de carburant par passager. Ensuite, le progrès technique, principalement sur les moteurs (en l'occurrence les turboréacteurs), mais également sur les avions eux-mêmes, a amélioré cette consommation. Ainsi l'amélioration de l'efficacité énergétique, mesurée en carburant consommé par passager et par kilomètre, était d'environ 1,5% par an entre 1975 et 2000<sup>70</sup>. Cette progression vient des améliorations technologiques couplées avec un renouvellement de la flotte, et dans une moindre mesure, de l'amélioration des taux d'occupation<sup>71</sup> et de la densification des cabines.

68 [https://www.culture.gouv.fr/Media/Thematiques/Etudes-et-statistiques/Files/Publications/Questions-de-culture/Culture-medias-2030\\_variables/Culture-medias-2030\\_fiche-21\\_Mobilites-geographiques](https://www.culture.gouv.fr/Media/Thematiques/Etudes-et-statistiques/Files/Publications/Questions-de-culture/Culture-medias-2030_variables/Culture-medias-2030_fiche-21_Mobilites-geographiques), et compilation des Comptes des transports 2007 et 2020.

69 <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2018-11/datalab-essentiel-138-mobilite-longue-distance-2016-fevrier2018.pdf>

70 Lee, 2010. *Can we accelerate the improvement of energy efficiency in aircraft systems?* Energy conversion and management. Le rapport de l'ICCT de 2015 montre toutefois que les gains sont de plus en plus faibles : -2% entre 1970 et 90 puis -0.8% entre 1990 et 2015.

71 C'est-à-dire la diminution de la proportion de sièges voyageant vides.

67 <https://www.alternatives-economiques.fr/economie-de-vitesse-ivan-illich-revisite/00081433>

**Les appareils les plus récents peuvent consommer 15 à 20% de moins que ceux de la génération précédente.**

**La mise en œuvre d'un nouveau programme ambitieux de développement aéronautique**, orienté résolument vers un objectif de réduction de l'impact climatique, représente une opportunité pour redynamiser l'innovation qui a toujours prévalu dans le domaine aéronautique et pour renouer avec la tendance à l'amélioration énergétique des avions, en cours d'essoufflement.

Le défi est immense, et les futurs avions devront répondre aux contraintes et enjeux suivants :

- **La diminution de l'impact climatique total par passer.km** : réduction de la consommation de carburant (efficacité énergétique) et réduction des effets hors-CO<sub>2</sub> (cf. 5.7.2), compatibilité maximale avec les énergies alternatives au kérosène (cf. 5.5.2) et amélioration radicale de l'efficacité énergétique des appareils par rapport à la génération de turboréacteurs commerciaux la plus récente.

- **L'évolution des besoins de mobilité aérienne** : le changement climatique est de nature à transformer en profondeur le besoin en mobilité et donc à changer durablement les habitudes de voyages de toute distance. Les nouveaux avions devront donc s'adapter aux nouveaux besoins.

- **L'évolution du climat** : avec le changement climatique, les caractéristiques physiques de l'atmosphère, c'est-à-dire du milieu dans lequel l'avion se propulse sont modifiées : température, humidité, répartition des couches atmosphériques et des turbulences, etc. Les conditions de vol (altitude, vitesse, ...) pourraient donc être modifiées. Les nouveaux avions doivent anticiper cela afin de garder des performances optimales dans ces conditions.

Pour répondre à ces enjeux, sur la partie technique, des axes d'amélioration de performances énergétiques et de réduction des émissions avions et moteurs existent. Les principales pistes identifiées à ce jour sont :

#### **Pour les aéronefs :**

- L'allègement de la masse de l'appareil (matériaux, structure, ...) ;
- L'amélioration de l'écoulement de l'air autour de l'avion (e.g. laminarité, intégration motrice, optimisation de formes) ;
- Les nouvelles architectures avion (ailes volantes, ingestion de couche limite, ...).

#### **Pour les moteurs :**

- Amélioration de l'efficacité thermique (en maîtrisant les émissions de NO<sub>x</sub> et de particules fines et ainsi notamment réduire l'occurrence des traînées de condensation) ;
- Amélioration de l'efficacité propulsive : augmentation des taux de dilution sur les turboréacteurs allant jusqu'au turbopropulseur ;

- La technologie Open-Rotor, qui vise à conjuguer amélioration d'efficacité thermique et propulsive ;

- Amélioration du taux d'incorporation de carburants alternatifs (cf. 5.5.2).

Il existe également des études pour les avions en rupture technologique forte, basées sur l'utilisation d'une source d'énergie alternative au kérosène : Avions Hybrides Electrique, Avions à hydrogène. L'utilisation de ces énergies ne se limite pas simplement à adapter ni même remplacer les moteurs, mais bien à revoir l'architecture de l'avion. Ces points sont abordés également au paragraphe 5.5.2.

La technologie turbopropulseur étant déjà disponible, elle pourrait être appliquée à plus court-terme pour les vols intérieurs de petite capacité. Elle est étudiée au paragraphe 7.2.1.2. L'intégration des autres technologies nécessitant de concevoir de nouveaux avions, elles arriveraient donc sur le marché à plus long terme. Ces différentes pistes technologiques et leur efficacité attendue sont étudiées au paragraphe 7.2.2.2.

## **5.5.2 Les énergies alternatives**

Pour l'aviation comme pour les autres secteurs consommateurs de carburants liquides d'origine fossile, la piste du recours aux sources d'énergie alternatives au kérosène (le carburant Jet A-1 en Europe) constitue un levier important de réduction des émissions. C'est d'ailleurs un élément clef mis en avant par le secteur comme détaillé aux paragraphes 5.9.1 et 5.9.5.2. Les sources d'énergie alternatives, ciblées actuellement par le secteur aéronautique sont de 4 natures différentes.

### **5.5.2.1 Les Biocarburants**

Les dernières générations d'avion actuellement en service sont certifiées pour une capacité de fonctionnement incorporant jusqu'à 50% de biocarburant. Toutefois, le niveau de production ne permet pas, et de loin, d'atteindre ce taux aujourd'hui, et les biocarburants disponibles sont essentiellement des biocarburants de 1<sup>ère</sup> génération. Les biocarburants de 1<sup>ère</sup> génération sont essentiellement produits à partir de graines de plantes, soit d'origine oléagineuse (colza, tournesol) soit d'origine céréalière (éthanol à partir du blé ou du maïs). Le secteur aérien cible néanmoins un usage des biocarburants de 2<sup>ème</sup> génération et plus. Leur avantage principal par rapport à la 1<sup>ère</sup> génération est que leur production réduit considérablement la concurrence aux surfaces agricoles, habitables ou forestières. Ils sont synthétisés par exemple à partir de déchets forestiers, agricoles, municipaux.

### **5.5.2.2 Les PTL (Power-to-Liquid)**

Les PTL (Power-to-Liquid) sont des carburants synthétiques que l'on peut produire à partir de CO<sub>2</sub> et d'hydrogène (H<sub>2</sub>). Le CO<sub>2</sub> peut être obtenu par captation dans l'air ou en sortie de zone de production (rejets d'usines par exemple). Si cette technologie semble particulièrement attrayante du point de vue de la décarbonation, son impact climatique dépend des procédés de mise en œuvre, en particulier du caractère décarboné de l'énergie utilisée pour la synthèse des PTL et, en amont de la chaîne, de l'hydrogène.

### 5.5.2.3 L'hydrogène

En rendant public l'avant-projet « ZEROe », devant conduire à la livraison d'un court/moyen-courrier à hydrogène en 2035, Airbus a mis en avant l'hydrogène comme vecteur énergétique d'avenir pour la décarbonation du transport aérien sur ce segment.

L'hydrogène peut être utilisé sous forme liquide ou gazeuse, directement en combustion dans le moteur ou afin de produire l'électricité en vol via une pile à combustible (fuel cell en anglais). Il présente l'avantage de ne pas émettre de CO<sub>2</sub> lors de sa combustion avec l'oxygène (uniquement de l'eau). Son inconvénient est sa densité énergétique volumique, trois fois inférieure à celle du kérosène lorsqu'il est sous forme liquide (ce qui demande de le stocker à -253°C et à 3 bars) et sept fois inférieure s'il est stocké sous forme gazeuse à 700 bars. Son stockage à bord prend donc au mieux trois fois plus de place à mission équivalente. La nature chimique de l'hydrogène présente également un défi de sécurité et de certification de par sa nature naturellement explosive sous forme gazeuse au contact de l'oxygène. Les effets « hors CO<sub>2</sub> » de la combustion de l'hydrogène en altitude devraient être également diminués, mais il existe à ce jour très peu d'études sur ce sujet.

L'hydrogène n'est pas un gaz présent naturellement dans l'atmosphère : il faut le synthétiser. Ainsi, comme pour les PTL, l'efficacité de son pouvoir décarbonant réel dépend de son procédé de production. Aujourd'hui, **95% de l'hydrogène produit dans le monde pour des procédés industriels, notamment dans les raffineries, l'est à partir de matières fossiles<sup>72</sup>** via différents procédés (oxydation d'hydrocarbures, vaporeformage de méthane et gazéification de charbon) qui dégagent du CO<sub>2</sub>. Il faut donc transformer massivement la chaîne de production de l'hydrogène (par exemple en remplaçant les chaînes existantes par de l'électrolyse d'eau ou de saumure alimentée en électricité renouvelable et/ou en développant les solutions de capture et séquestration de carbone - CSC - sur les centrales utilisant le gaz ou le charbon), et la mettre à l'échelle de la demande pour l'aérien et de tous les secteurs d'activité qui seront demandeurs d'hydrogène. De plus, la question de l'adaptation des infrastructures aéroportuaires est un défi majeur nécessitant une synchronisation et une coopération internationale critique pour la réussite du projet de réduction des émissions de GES.

### 5.5.2.4 L'électricité

Il existe aujourd'hui des avions de tourisme fonctionnant avec des batteries électriques. La piste d'avions hybrides (carburant / batteries électriques), pour les très courtes liaisons (les « commuturs ») ou les liaisons régionales est étudiée par l'industrie. Là encore, le pouvoir décarbonant de cette technologie dépend du processus de production de l'électricité (sans parler des externalités liées à la fabrication des batteries). En outre, une autre difficulté pour une utilisation aéronautique tient dans la faible densité énergétique par unité de masse des batteries. Là où le kérosène possède une densité énergétique de l'ordre de 10kWh/kg, la densité énergétique des meilleures batteries actuelles est de l'ordre de 1kWh/kg. À puissance

équivalente, il faut donc une masse de batteries 10 fois supérieure au kérosène, ce qui limite fortement le rayon d'action et la masse embarquée avec ce type de technologie.

### 5.5.2.5 En synthèse

**Les biocarburants et les PTL présentent l'avantage de pouvoir être « drop-in », c'est-à-dire qu'ils ne nécessitent pas ou peu d'évolution sur les moteurs et les avions existants. En revanche, pour l'hydrogène ou l'électricité, il s'agit en fait de concevoir un nouvel avion, en rupture technologique forte.**

Le pouvoir décarbonant des biocarburants et des PTL ne s'exprime pas lors de la combustion, qui est aussi émettrice que le kérosène. Il provient de l'absorption amont de CO<sub>2</sub> nécessaire à leur fabrication et de leur processus de fabrication.

Ainsi la décarbonation réelle liée à l'utilisation de ces énergies alternatives ne peut s'évaluer qu'en regardant le cycle de vie complet, de la fabrication à la combustion en vol. C'est la raison pour laquelle il est nécessaire d'intégrer également les émissions de la partie amont pour le kérosène (extraction du pétrole, fabrication, transport, ...) si l'on veut pouvoir réellement mesurer l'impact de réduction des émissions (cf. 5.9.2)

*L'étude de l'utilisation des carburants alternatifs et des externalités engendrées est étudiée en détail aux paragraphes 0 et 7.2.2.2 en ce qui concerne l'avion à hydrogène.*

## 5.5.3 Le renouvellement des flottes

Renouveler les flottes n'est pas un progrès technique en soi, mais le moyen de diffuser le progrès technique et d'obtenir concrètement les résultats attendus concernant les émissions de GES dans l'atmosphère.

Selon l'OACI, **la flotte mondiale est actuellement renouvelée en 25 ans**. La cadence de renouvellement est un paramètre dépendant de la demande des compagnies (donc à leur capacité d'investissement et à leur bonne santé financière) et à la capacité de production de l'industrie. Cette dernière fait l'objet d'une planification à moyen-long terme en fonction de la prévision de la demande des compagnies. Les temps de production et les investissements matériels et humains nécessaires s'inscrivant dans la durée, l'industrie doit se prémunir des risques de variation de la demande et les anticiper en permanence. Augmenter ou réduire la capacité de production est donc une décision structurante : des variations brutales de la demande, telles que celle observée depuis le début de la crise COVID, sont particulièrement déstabilisantes. Ainsi, si l'accélération du rythme de renouvellement des flottes peut être une mesure envisagée pour réduire les émissions, elle a des impacts importants sur l'industrie et nécessite des investissements financiers. Dans un contexte de moindre croissance, a fortiori en période de crise, ces investissements ne peuvent plus être financés comme par le passé par le secteur lui-même, mais par de l'argent public. Ils doivent alors s'inscrire dans le cadre d'une politique de long terme visant à accélérer la diffusion du progrès technique dans les flottes en service. Ce point fait l'objet de la mesure détaillée en 7.2.2.1.

<sup>72</sup> <https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/enjeux-et-prospective/decryptages/energies-renouvelables/tout-savoir-lhydrogene>

Afin de prévoir l'impact réel en termes d'émissions des innovations sur les avions et les moteurs, des énergies alternatives et du renouvellement de flotte, différents scénarios synchronisant ces trajectoires technologiques sont étudiés au paragraphe 7.2.3.

### 5.5.4 Optimisation des opérations

**L'optimisation des opérations permet de minimiser le temps d'utilisation des moteurs et l'énergie nécessaire pour fournir un même service de transport point à point.**

Ces opérations se divisent en deux catégories bien distinctes :

- **Les opérations au sol :** embarquement, débarquement, roulage jusqu'à la piste (« Taxi out »), roulage de la piste jusqu'au point de débarquement (« Taxi in ») ;
- **Les opérations en vol :** les phases de « LTO » (« Landing and Take-Off », qui désignent les phases de décollage, de début de montée jusqu'à 3000ft (915m), d'approche et d'atterrissage) se distinguant de la croisière, ainsi que de la fin de la montée et du début de la descente.

Ces différentes phases et sous-phases du transport présentent des spécificités, des complexités et des contraintes bien précises. Elles sont d'ailleurs prises en charges, pour la régulation du trafic, par des équipes différentes du contrôle aérien. Mais elles ont un point commun : elles nécessitent toutes du kérosène. Ainsi, réduire les émissions dans ces différentes phases fait appel à des solutions bien différentes.

#### 5.5.4.1 Au sol

Pour les opérations au sol, les solutions envisagées consistent à :

- Réduire ou électrifier l'énergie fournie par l'APU (« Auxiliary Power Unit »), un « petit » turboréacteur logé généralement dans la queue de l'avion en charge d'assurer la puissance électrique à bord, la climatisation de la cabine ou le fonctionnement des vérins hydrauliques, tant que les moteurs principaux ne sont pas démarrés. Il sert également en vol de source de puissance de secours en cas de panne des circuits principaux ;
- Réduire la puissance de propulsion au roulage ou électrifier les phases de roulage.

Pour l'électrification, un point d'attention concerne les émissions associées à la production de l'électricité : si l'électricité nécessaire est fortement carbonée (avec un mix électrique dépendant principalement de centrales à charbon par exemple), le problème n'est alors que déplacé. La décarbonation des opérations au sol est un axe déployable à court/moyen-terme étudiée en détail au paragraphe 7.2.1.1.

#### 5.5.4.2 En vol

Avec l'augmentation du trafic, et donc du nombre d'avions dans un espace aérien fixe, la pression commerciale et concurrentielle des compagnies, les différences de gestion entre les pays, les zones de conflit, la gestion des aléas météorologiques, techniques ou de tout autre aléa perturbant le

trafic, l'optimisation des trajectoires de vol est un problème d'une complexité croissante.

Les compagnies peuvent arbitrer pour un vol donné entre le temps de vol et la consommation de carburant. Cet arbitrage se traduit au travers de l'ajustement d'un indicateur appelé « Cost Index ». La réduction du Cost Index à 0 est une mesure qui pourrait être mise en œuvre à court terme. Elle est étudiée au paragraphe 7.2.1.4.

De nombreux autres projets sont à l'étude. Ils nécessitent a minima un niveau d'harmonisation et de synchronisation entre les différents pays et les différents acteurs, parfois concurrents, qui les rend difficile à mettre en œuvre rapidement. Nous pouvons noter en particulier le projet « Ciel Unique Européen / Single European Sky (SES) », dont l'objectif principal est de s'affranchir des frontières entre pays pour optimiser les flux de trafic, et son volet technologique « SESAR ». Ce dernier volet est pris en compte dans la réalisation des éléments ASBU<sup>73</sup> du GANP 2019<sup>74</sup> de l'OACI. Les éléments ATM de ce plan, ébauchés dans le rapport environnement 2019 de l'OACI, sont aussi progressivement étudiés et mis en place par les pays membres.

L'optimisation des routes est **possible mais difficile, ne pourra pas être mis en œuvre par trafic dense, et pour un gain encore à démontrer**. Les pistes d'optimisation des opérations en vols sont étudiées au paragraphe 7.2.2.1.

Evoquons enfin l'éco-pilotage qui regroupe l'ensemble de ces bonnes pratiques et dont les outils de big data permettent de visualiser la performance collective ou individuelle des équipages. À dire d'expert, les outils ont un impact puissant sur la sensibilisation des pilotes et créent même une forme d'émulation.

### 5.5.5 Voler moins vite ?

**Il serait légitime de s'interroger sur la possibilité de gagner en consommation de carburant en adoptant des vitesses plus réduites.** Après tout, le transport maritime ne pratique-t-il pas le « slow steaming » qui lui permet de fortes économies de carburant ?

Malheureusement, les choses ne fonctionnent pas ainsi pour l'aviation. En effet, si un navire peut ralentir pour réduire sa « traînée de forme », un avion doit, lui, se maintenir en l'air. Ainsi, pour générer la portance nécessaire, il est possible de jouer soit sur la charge des ailes (c'est-à-dire sur la déviation de l'écoulement), soit sur la vitesse de l'avion (Mach de vol). Le premier mécanisme est responsable de la traînée induite, alors que le second est responsable de la traînée de frottement. Deux mécanismes antagonistes sont donc responsables de la traînée totale de l'avion. En diminuant la vitesse, il est nécessaire d'augmenter la charge, ce qui se traduit par une augmentation de la traînée induite. En résumé, la traînée de frottement augmente avec le Mach de vol, mais la traînée induite diminue avec le Mach de vol. Ainsi, contrairement aux

73 Aviation System Block Upgrade <https://www.atmmasterplan.eu/exec/icao-blocks>

74 Global Air Navigation Plan

autres véhicules, qui consomment d'autant plus qu'ils vont vite, l'avion possède une vitesse optimale, intermédiaire, à laquelle il consomme le moins.

En pratique donc, les avions volent-ils à cette vitesse optimale ou vont-ils plus vite pour gagner du temps ? En fait, ils n'ont pas besoin de quitter la vitesse optimale pour aller plus vite, car cette vitesse est fonction de la densité de l'air. Pour augmenter sa vitesse sans consommer davantage, l'avion n'a qu'à prendre de l'altitude, où il trouve de l'air moins dense. Sa vitesse ne sera limitée *in fine* que des mécanismes physiques liés aux phénomènes transsoniques (apparition d'ondes de choc sur le profil qui augmentent drastiquement la traînée et font courir un risque structurel à l'appareil).

Ainsi, **pour un avion déjà existant, le gain de consommation envisageable en acceptant de rallonger la durée des vols est très faible**, car il ne porte que sur des paramètres de second ordre. Il serait néanmoins intéressant de mobiliser ce gain, d'autant plus que l'arbitrage effectué est rendu explicite à travers le « *cost index* » (cf. 7.2.1.4), paramètre de pilotage par lequel les compagnies indiquent combien de carburant elles acceptent de consommer en plus par unité de temps gagné.

Cependant, **accepter de voler à des vitesses moins élevées peut fournir des économies d'énergie substantielles, par le recours à des motorisations plus efficaces, ce qui nécessite toutefois de changer l'architecture de l'appareil : turbopropulseur, Open rotor.**

### 5.5.6 Voler plus gros ?

Dans le transport maritime, rassembler les marchandises sur un faible nombre de navires, aussi gros que possible, permet de limiter la consommation par tonne transportée. C'est pourquoi toutes les catégories de navires, des porte-conteneurs aux paquebots, connaissent une course au gigantisme. Ceci est vrai également pour la route : les passagers d'un autocar consomment significativement moins que ceux d'une voiture, à taux de remplissage comparable. Il est donc légitime de se demander si des effets d'échelle comparables existent dans le secteur aérien, ce qui permettrait alors de réaliser des économies de carburant en regroupant les passagers dans des avions aussi gros que possible.

Malheureusement, la physique de la conception d'un avion ne fonctionnent pas ainsi, et **la performance énergétique atteignable est relativement indépendante de la taille de l'avion**. C'est pourquoi le très fort développement du trafic aérien se fait sans augmentation conséquente de la taille des avions. En témoigne ainsi l'arrêt du programme A380 par Airbus début 2019, et l'arrêt récent du programme 747<sup>75</sup> par Boeing ; même si les causes de ces décisions sont multiples, l'heure n'est plus au développement d'appareils d'une telle capacité.

75 Le Boeing 747, mis en service il y a un demi-siècle, atteignait déjà la taille des plus gros avions vendus aujourd'hui.

## 5.6 Les organes de gouvernance

**Le secteur aérien étant international, sa décarbonation ne saurait être efficacement pilotée par des politiques menées indépendamment au sein de chaque pays.** Pour s'en convaincre, il suffit de rappeler que les vols internationaux représentent à l'échelle mondiale 60%<sup>76</sup> des émissions de CO<sub>2</sub> et que les engagements nationaux (INDC) remis par les Parties suite aux Accords de Paris ne mentionnent que les vols intérieurs<sup>77</sup>. En France, 80% de l'empreinte carbone de l'aérien est attribuée aux vols internationaux<sup>78</sup>, et, comme évoqué supra, ceux-ci ne sont pas pris en compte dans la SNBC<sup>79</sup>. Par conséquent, aussi efficaces seraient les politiques nationales de réduction des GES dans le cadre des INDC, elles ne s'attacheraient qu'à une part minoritaire du problème.

Par ailleurs, même si un pays décidait de mesures pour réduire l'empreinte carbone des vols extérieurs qui lui sont imputables, celles-ci n'auraient véritablement d'effet qu'à condition d'une coordination internationale de la réglementation et des efforts de décarbonation. En effet, toute politique locale de réduction de l'offre ou de la demande de transport aérien (par exemple par le biais de quotas, de réduction de slots ou via la fiscalité) mise en œuvre sans cette coordination se traduirait quasi instantanément par une mise en danger des acteurs nationaux. Il suffirait dès lors aux usagers, pour contourner une réglementation trop restrictive, soit de se reporter sur une compagnie étrangère concurrente soumise à une fiscalité moins coercitive, soit de s'envoler depuis un pays voisin dans lequel les restrictions pesant sur les compagnies ou les aéroports seraient moins contraignantes. Il en résulte dans tous les cas un déséquilibre du marché qui profite aux opérateurs étrangers. C'est alors la double peine : non seulement on ne réduit pas les émissions globales du secteur, mais on défavorise l'économie nationale ! Comment faire ?<sup>80</sup>

### 5.6.1 Système communautaire d'échange de quotas d'émission (EU-ETS)

Le système communautaire d'échange de quotas d'émission (SCEQE) (en anglais Emission Trading Scheme, ou encore European Union Emission Trading Scheme – EU-ETS) est un mécanisme de droits d'émissions de dioxyde de carbone mis en œuvre au sein de l'Union européenne. Il définit une limitation des gaz à émettre et met en place un marché du carbone permettant à chaque entreprise d'acheter ou de vendre des quotas d'émission, visant à réduire l'émission globale de CO<sub>2</sub>

76 Owen, Bethan; Lee, David S.; Lim, Ling (2010). "Flying into the Future: Aviation Emissions Scenarios to 2050". *Environmental Science & Technology*. 44 (7): 2255–2260. doi:10.1021/es902530z. PMID 20225840.

77 [https://unfccc.int/files/adaptation/application/pdf/all\\_parties\\_indc.pdf](https://unfccc.int/files/adaptation/application/pdf/all_parties_indc.pdf)

78 [https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/Emissions\\_gazeusesVF.pdf](https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/Emissions_gazeusesVF.pdf)

79 Stratégie nationale bas carbone. <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/strategie-nationale-bas-carbone-snbc>

80 Ce sujet rejoint d'ailleurs celui, plus vaste, de l'intérêt d'un réseau de liaisons point à point par rapport à un modèle de type Hubs & Spokes. La pertinence d'un type d'organisation plutôt qu'un autre n'est pas abordée dans ce rapport et mériterait une étude comparative approfondie, ce que nous ferons peut-être dans une publication ultérieure !

et à atteindre les objectifs fixés pour l'Union européenne au sein du protocole de Kyôto. Les entreprises qui font des efforts sont ainsi récompensées tandis que celles qui ont dépassé leurs plafonds d'émissions doivent acheter des quotas d'émission auprès d'entreprises plus vertueuses du point de vue environnemental.

EU-ETS est présenté par l'UE comme la pièce maîtresse de sa politique en matière de lutte contre le changement climatique et un outil essentiel pour réduire de manière économiquement avantageuse les émissions de gaz à effet de serre. Premier grand marché mondial du carbone, il est aussi le plus vaste. EU-ETS fonctionne dans les 31 pays de l'Espace économique européen. Il encadre actuellement les émissions de près de 11 000 fournisseurs d'énergies et industries sur le territoire de l'UE, soit 45% de ses émissions de GES. Son déploiement est prévu en 4 phases sur 25 ans, de 2005 à 2030, et doit permettre d'atteindre en 2030 une réduction de 43% des GES par rapport à 2005 sur le périmètre considéré<sup>81</sup>.

À partir de 2012, EU-ETS devait intégrer les émissions de CO<sub>2</sub> de l'aviation civile en application de la directive 2008/101/CE du 19 novembre 2008. Dès lors qu'elles desservait l'Union, les compagnies aériennes de toute nationalité étaient supposées obtenir des quotas pour couvrir les émissions produites par leurs avions desservant des aéroports européens. Chaque avion traversant l'espace aérien européen étant considéré comme une source d'émission de CO<sub>2</sub>, au même titre qu'une usine ou une centrale. EU-ETS envisageait en 2010 d'obliger tout opérateur ayant au moins un vol au départ ou à l'arrivée de l'Europe à :

- Rapporter annuellement les émissions des vols associés à une autorité compétente au sein d'un des états membres de l'Union européenne ;
- Remettre annuellement des crédits de tonnes de CO<sub>2</sub> dans le même rapport que celles émises sur l'année en cours.

Les compagnies devaient racheter l'équivalent de 15 % de leurs émissions sur le marché du CO<sub>2</sub> (multi-industries), le reste étant distribué gratuitement<sup>82</sup>. Les recettes devaient être utilisées dans le cadre de la lutte contre le changement climatique.

L'inclusion de l'aviation dans EU-ETS a été contestée par 26 États extérieurs à l'Union européenne devant le Conseil de l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI). Afin de permettre au secteur de réfléchir et de proposer une solution globale et crédible, l'Union européenne a assoupli en 2013 sa législation de façon temporaire jusqu'en 2021. Profitant de ce délai, les acteurs du secteur aérien ont fait émerger une proposition alternative : CORSIA.

## 5.6.2 CORSIA

CORSIA (pour Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation) est né de cette réflexion du secteur. Ce mécanisme de compensation d'émissions est défini par l'OACI, soutenu par l'IATA et par les compagnies aériennes, et déployé à l'échelle mondiale depuis son adoption par les états membres de l'OACI, dont la France, en 2016.

Le projet de compensation des émissions de CO<sub>2</sub> défendu par CORSIA vise le plafonnement de ces dernières au niveau de 2019 pour les vols internationaux uniquement (donc ne concerne pas les vols dits domestiques comme intra-Etats-Unis, ou intra-Chine). La Commission européenne et les États membres de l'Union évaluent à l'heure actuelle cette proposition, afin de s'assurer que l'objectif d'acceptabilité du programme ne se fait pas au dépend de l'ambition climatique. Une consultation publique a été lancée par la Commission européenne sur le sujet de CORSIA et de sa coexistence possible avec l'EU-ETS en juillet 2020.

Ces compensations sont assurées par les exploitants d'aviation commerciale émettant plus de 10 MtCO<sub>2</sub> chaque année. La comptabilité carbone repose sur une approche route-by-route permettant un traitement égal pour tous les exploitants. Pour ce faire, un processus de surveillance, de déclaration et de vérification (MRV pour Monitoring, Reporting, Verification) sous l'autorité de leurs États membres (qu'ils soient inclus dans CORSIA ou pas) et l'OACI, est mis en place à partir de 2019 afin d'accompagner les exploitants dans la comptabilité de leurs émissions annuelles et des crédits de compensation achetés. Les participants de CORSIA doivent ensuite acheter des crédits carbone sur un marché spécifique international pour compenser leurs émissions au-dessus du niveau de 2019, ces crédits étant émis par des entreprises qui ont des activités de réduction de GES.

Les critères auxquels tout crédit carbone CORSIA doit répondre sont recensés dans les *Emissions Units Eligibility Criteria*<sup>83</sup> et approuvés par l'OACI, qui dispose également d'un Organe consultatif technique (Technical Advisory Body) composé de 19 experts, nommés par les gouvernements participants. Leur travail consiste à décider quels crédits de carbone/unités d'émissions de carbone seront autorisés. L'OACI travaille par ailleurs avec une liste d'organismes<sup>84</sup> assurant une mise en lien entre les acteurs du secteur et les initiateurs de projets compatibles. Ces projets ont par exemple vocation à reforester des zones dégradées, réduire l'utilisation d'intrants phytosanitaires azotés dans l'agriculture, restaurer des zones humides, capturer et stocker du carbone, développer les énergies renouvelables.

Le programme se décompose en deux phases : la première (dont une phase pilote de 2021 à 2023) de 2021 à 2026 pendant laquelle seuls les États volontaires sont inclus (aujourd'hui 88

81 [https://ec.europa.eu/clima/policies/ets\\_fr](https://ec.europa.eu/clima/policies/ets_fr)

82 Cette proportion étant prévue pour diminuer au fil des ans (le "green deal" européen s'étant fixé pour feuille route d'annuler les allocations gratuites pour le secteur aérien à court terme).

83 <https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Pages/CORSIA-Emissions-Units.aspx>

84 Pour la période 2021-2023 les structures retenues sont les suivantes : American Carbon Registry, China GHG Voluntary Emission Reduction Program, Clean Development Mechanism, Climate Action Reserve, Gold Standard, VCS Program.

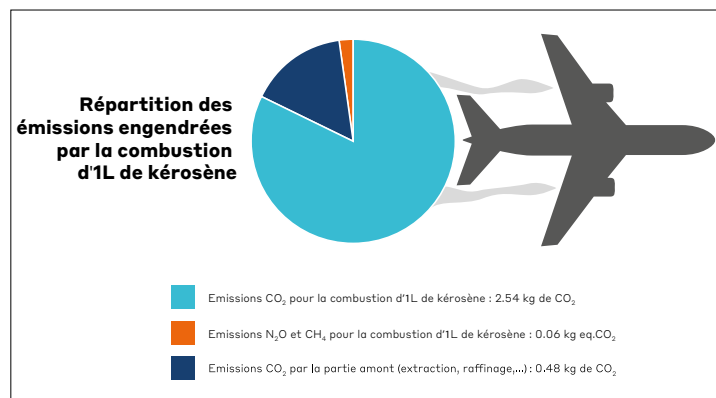
États<sup>85</sup>, soit 77% des vols réguliers internationaux), puis de 2027 à 2035 comprenant tous les États membres de l'OA-Cl responsables d'une part suffisante de l'activité aérienne internationale. Les États faisant partie des *Least Developed Countries* (LDCs), *Small Island Developing States* (SIDS) et *Landlocked Developing Countries* (LLDCs) ne sont pas inclus dans CORSIA.

**N.B.** il importe de distinguer les émissions couvertes des émissions compensées. Les émissions couvertes correspondent aux émissions que CORSIA intègre à l'assiette de calcul. Elles sont comptabilisées par les différents acteurs qui les font remonter au législateur. Les émissions compensées, elles, sont la part des émissions couvertes qui vont effectivement être échangées sur le marché carbone et donner lieu au financement de projets à émissions dites "négatives". CORSIA est pensé pour ne compenser que les émissions internationales supérieures au niveau de 2019. Ainsi à croissance de trafic international nulle, la compensation serait nulle, toutes choses égales par ailleurs.

## 5.7 Contribution du transport aérien au changement climatique à ce jour

Afin de bien appréhender ce qui suit, il est nécessaire d'avoir en tête les notions présentées au paragraphe 4.1.

### 5.7.1 Émissions de CO<sub>2</sub> en 2018



La combustion d'un litre de kérosène émet 2,540 kg de CO<sub>2</sub>, auxquels il faut ajouter 0,479 kg pour la partie amont (extraction, raffinage et transport), soit un facteur d'émission total de 3,019 kg de CO<sub>2</sub> par litre de kérosène brûlé<sup>86</sup>. Lorsque l'on tient compte des émissions de méthane (CH<sub>4</sub>) et de protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O) la valeur devient 3,075 kg équivalent CO<sub>2</sub> par litre de kérosène brûlé.

<sup>85</sup> [https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Documents/CORSIA\\_Newsletter\\_Oct2020.pdf](https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Documents/CORSIA_Newsletter_Oct2020.pdf)

<sup>86</sup> Selon les données de la BaseCarbone® de l'ADEME. Rapporté au kg de kérosène, ces chiffres deviennent : 3,150 kg de CO<sub>2</sub> par kg de kérosène brûlé et 3,750 kg de CO<sub>2</sub> avec l'amont. Lorsque l'on tient compte des émissions de méthane (CH<sub>4</sub>) et de protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O) la valeur devient 3,825 kg équivalent CO<sub>2</sub>

**Au niveau mondial, l'aviation civile a émis 905 Mt de CO<sub>2</sub> en 2018<sup>87</sup> (hors partie amont), soit 1,077 Gt de CO<sub>2</sub> si l'on intègre la partie amont.** Le tableau ci-dessous présente l'évaluation de sa contribution aux émissions de CO<sub>2</sub> mondiales.

| 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>88</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>   | <b>2,5 %</b> de 36,6 Gt CO <sub>2</sub>                                                  | <b>2,1 %</b> de 42,1 Gt CO <sub>2</sub>                     |
| Combustion + amont                                                   | 1 077 Mt CO <sub>2</sub> | <b>2,9 %</b> de 36,6 Gt CO <sub>2</sub>                                                  | <b>2,6 %</b> de 42,1 Gt CO <sub>2</sub>                     |

Tableau 3 - Contributions du secteur aérien aux émissions de CO<sub>2</sub> en 2018

Les parts de contribution du secteur aux émissions de CO<sub>2</sub> mondiales varient selon que la partie amont est comptée ou non au numérateur et que la déforestation et le changement d'usage des sols sont comptés ou non au dénominateur.

### 5.7.2 Effets hors CO<sub>2</sub>

**L'aviation contribue également au changement climatique anthropogénique au travers d'un ensemble de procédés physico-chimiques complexes, regroupés sous le terme « effets hors CO<sub>2</sub> »<sup>89</sup>.** Ces effets sont les conséquences des émissions à haute altitude d'oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>), de vapeur d'eau et d'aérosols de particules (composés sulfatés et suies carbonées) dans les gaz d'échappement des moteurs.

Les différents mécanismes en jeu sont explicités ci-dessous d'après l'étude publiée dans la revue *Atmospheric Environment* en 2020 par Lee et al.<sup>90</sup>, qui constitue une synthèse des connaissances actuelles sur le sujet.

<sup>87</sup> Quantité de CO<sub>2</sub> seul en 2018 (sans prise en compte des autres gaz à effet de serre) tirée du tableau « June 2020 » in IATA, Airline Industry Economic Performance – June 2020 – Data Tables. D'autres sources fournissent des valeurs différentes mais du même ordre de grandeur, ce qui suffit pour notre étude ici : 918 Mt selon l'ICCT, 905 Mt selon l'EESI, ou 918 Mt selon l'OACI.

<sup>88</sup> Voir Le Quéré, 2019, Global Carbon Project, Les valeurs données mentionnent uniquement le CO<sub>2</sub>.

<sup>89</sup> D'autres activités humaines sont également à l'origine d'effets hors CO<sub>2</sub> influençant le climat : l'agriculture (avec des émissions d'oxydes d'azote et de méthane) et le transport maritime (particules fines, suies et composés sulfatés).

<sup>90</sup> D.S. Lee, D.W. Fahey, A. Skowron, M.R. Allen, U. Burkhardt, Q. Chen, S.J. Doherty, S. Freeman, P.M. Forster, J. Fuglestad, A. Gettelman, R.R. De León, L.L. Lim, M.T. Lund, R.J. Millar, B. Owen, J.E. Penner, G. Pitari, M.J. Prather, R. Sausen, L.J. Wilcox, The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018, *Atmospheric Environment*, 2020, 117834, ISSN 1352-2310, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117834> (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231020305689>)

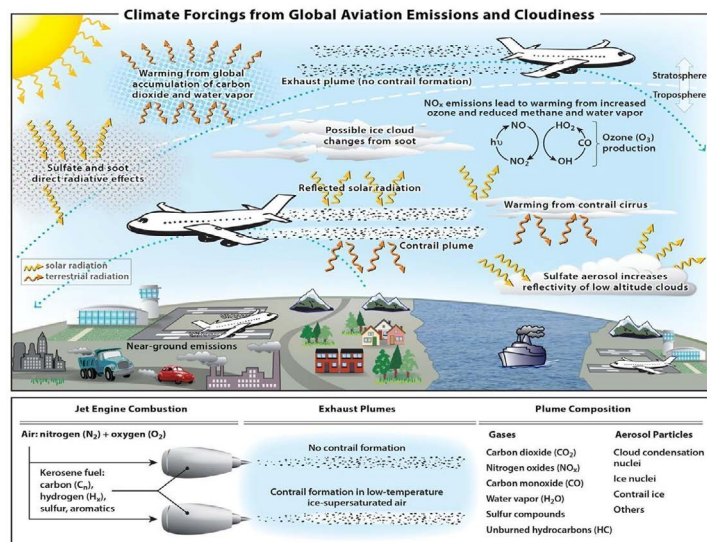


Figure 9 - mécanismes de forçage radiatif causés par les émissions de CO<sub>2</sub>, de vapeur d'eau, et d'aérosols de particules, et par la nébulosité induite par l'aviation <sup>91</sup>

Les mécanismes décrits ci-dessous sont valables pour les motorisations et carburants actuels. L'influence d'un changement du type de carburant (biocarburants, PTL, hydrogène...) n'est à ce jour pas connue.

Dans des conditions particulières de température, d'hygrométrie et de pression, la vapeur d'eau et les aérosols contenus dans les gaz d'échappement des moteurs vont causer localement la formation de traînées de condensation, pouvant se transformer en cirrus. Ces nuages anthropogéniques d'altitude sont de fins nuages de cristaux de glace qui se développent entre 5 et 14 km d'altitude (l'altitude de croisière des avions étant généralement entre 9 et 12 km d'altitude)<sup>92</sup>. Ils disparaissent après une période de quelques minutes à quelques jours tout au plus. Ils ont un effet réchauffant car ils présentent un très fort contraste de température avec la surface et génèrent donc un fort effet de serre qui l'emporte sur leur effet d'albédo.

Les oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>) sont soumis à des réactions photochimiques qui augmentent à court terme la formation d'ozone (O<sub>3</sub>) troposphérique<sup>93</sup> et une réduction de la durée de vie et de la concentration de méthane (CH<sub>4</sub>)<sup>94</sup> dans l'atmosphère. La réduction de la concentration de méthane engendre à son tour une diminution lente et à long terme de la concentration d'ozone ainsi que de la concentration de vapeur d'eau (H<sub>2</sub>O) dans la stratosphère. Ces différents phénomènes cumulés ont un effet net réchauffant du fait de la prépondérance de l'effet réchauffant dû à l'ozone troposphérique.

Des interactions radiatives se produisent également avec les aérosols composés de suies (absorption du rayonnement à ondes courtes<sup>95</sup>, conduisant à un effet réchauffant) et les aérosols constitués par des composés sulfatés (dispersion du rayonnement solaire entrant, conduisant à un refroidissement).

Pour les vols à haute altitude, durant la phase de croisière, l'émission de vapeur d'eau dans la basse stratosphère perturbe l'équilibre radiatif de la vapeur d'eau, conduisant à un effet réchauffant.

Il existe enfin un autre type d'effets hors CO<sub>2</sub> : les interactions entre les aérosols (suies carbonées, composés sulfatés) et les nuages, qui influencent la formation de ces derniers. Selon Lee *et al.*, l'état des connaissances ne permet pas aujourd'hui de conclure sur une estimation fiable du forçage radiatif effectif induit par ces interactions, à la fois pour l'aviation et pour l'ensemble des activités humaines.

### 5.7.3 Forçage radiatif effectif net induit par l'aviation

Dans leur étude, Lee *et al.* donnent les meilleures estimations disponibles à date pour les forçages radiatifs effectifs du CO<sub>2</sub>, de la majeure partie des effets hors CO<sub>2</sub> et du forçage radiatif net de l'aviation pour chaque année entre 2000 et 2018 en le calculant depuis 1940. L'année 1940 est prise comme année de référence car l'aviation commerciale étant quasiment inexistante avant cette date : cela revient en pratique à des estimations par rapport à l'année 1750 comme classiquement fait.

Seule la contribution des interactions entre les nuages et les aérosols n'est pas prise en compte, en l'absence d'estimations fiables disponibles à ce jour. Pour les effets hors CO<sub>2</sub> dont les forçages radiatifs effectifs sont quantifiés, les intervalles de confiance à 95% restent importants. Il est malgré tout nécessaire de tenir compte des valeurs obtenues, ces effets représentant une forte proportion du forçage radiatif effectif net de l'aviation.

**L'aviation provoque ainsi un forçage radiatif effectif net de 100,9 [55 – 145] mW.m<sup>-2</sup> pour l'année 2018, le CO<sub>2</sub> y contribuant à hauteur d'environ 1/3, avec 34,3 [28 – 40] mW.m<sup>-2</sup>, les effets hors CO<sub>2</sub> à hauteur de 2/3 (66,6 [21 – 111] mW.m<sup>-2</sup>).**

Le détail des valeurs et des intervalles de confiance à 95% est présenté ci-dessous<sup>96</sup>, de la contribution la plus importante à la moins importante.

<sup>91</sup> Figure 1 in Lee *et al.*, 2020, The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018

<sup>92</sup> Voir articles Wikipedia : Nuages anthropogéniques, section Cirrus créés par les avions à réaction et Traînées de condensation

<sup>93</sup> L'ozone, gaz à effet de serre puissant, est qualifié de « troposphérique » pour le distinguer de sa part présente en plus haute altitude, l'ozone stratosphérique, qui joue un rôle de protection du vivant contre les rayonnements ultra-violet.

<sup>94</sup> Le méthane est, par ordre d'importance dans les émissions de gaz à effet de serre, le deuxième de ces gaz, après le CO<sub>2</sub>. En plus des flux naturellement émis par certains écosystèmes, ses principales émissions proviennent du secteur agricole, et de rejets des secteurs pétrolier et gazier.

<sup>95</sup> Rayonnement dont les longueurs d'onde sont comprises entre 0,4 et 0,9 m. Il comprend la lumière visible, le proche infrarouge et le proche ultraviolet (voir : Futura Sciences, Bilan Radiatif de la Terre)

<sup>96</sup> Figure 3 in Lee *et al.*, 2020, The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018. Les totaux nets des forçages radiatifs effectifs des effets hors CO<sub>2</sub> et de l'aviation (CO<sub>2</sub> et hors CO<sub>2</sub>) ne correspondent pas à la somme arithmétique des estimations de chacun des effets, en raison des distributions de probabilités de valeurs séparées et nécessitant une analyse de Monte-Carlo pour être déterminées.

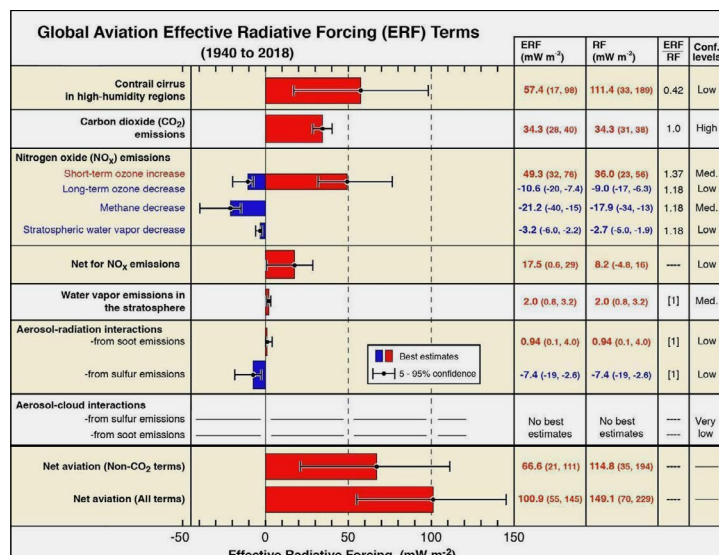
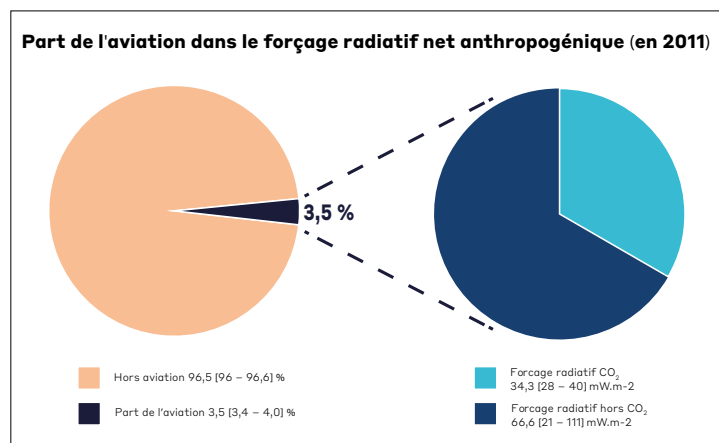


Figure 10 - composantes contribuant au forçage radiatif effectif de l'aviation, classées par ordre décroissant.

Il est à noter qu'en 2018, le forçage radiatif effectif des traînées de condensation et des cirrus anthropogéniques est 1,7 fois plus important que celui du CO<sub>2</sub> émis. Dit autrement, à un instant donné en 2018, les nuages induits par les avions sur les derniers jours (les nuages plus anciens ayant disparu) génèrent un forçage radiatif effectif presque deux fois plus important que tout le CO<sub>2</sub> émis sur toute l'histoire de l'aviation depuis les premiers vols des frères Wright en 1903, soit sur plus de 100 ans. Ces nuages ont ainsi une contribution majeure au réchauffement en l'accéléralant très fortement.



Pour comparer le forçage radiatif effectif net de l'aviation au forçage radiatif effectif anthropogénique, Lee *et al.* se basent sur les valeurs de l'année 2011, le forçage radiatif effectif anthropogénique étant estimé à ce jour de manière fiable<sup>97</sup> entre 1750 et 2011 (2290 [1130 – 3300] mW.m<sup>-2</sup>). **En 2011, la part de l'aviation s'établissait ainsi à 3,5 [3,4 – 4,0] % du forçage radiatif net anthropogénique, en tenant compte du CO<sub>2</sub> et des effets hors CO<sub>2</sub>, et 1,59 [1,56 – 1,65] % pour le CO<sub>2</sub> seul<sup>97</sup>** (forçage radiatif effectif total net de l'aviation estimé à 80,4 [45 – 114] mW.m<sup>-2</sup> et à 29,0 [24 – 34] mW.m<sup>-2</sup> pour le CO<sub>2</sub> seul, calculés entre 1940 et 2011).

<sup>97</sup> Table 2 in Lee *et al.*, 2020, The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018

## 5.7.4 Chiffres clés de la contribution totale de l'aviation au changement climatique anthropogénique et principes fondamentaux pour la réduction de cette contribution

Pour déterminer les chiffres clés de la contribution totale de l'aviation au changement climatique anthropogénique, incluant la combustion du kérosène, la partie amont et les effets hors CO<sub>2</sub>, le premier réflexe consisterait à **quantifier les émissions de polluants climatiques<sup>98</sup> générés par le trafic aérien en « équivalent CO<sub>2</sub> » en utilisant la métrique GWP<sub>100</sub><sup>99</sup>** compatible avec les standards actuellement usités pour l'évaluation des émissions de gaz à effet de serre.

La méthode associée permet de calculer la quantité de CO<sub>2</sub> qui produirait le même forçage radiatif effectif moyen sur les 100 prochaines années qu'une quantité donnée de polluant climatique, en tenant compte que, sur cette période, des mécanismes éliminent ledit polluant et le CO<sub>2</sub> de l'atmosphère. Par exemple, émettre 1 kg de méthane a un équivalent CO<sub>2</sub> à 100 ans de 32 kg CO<sub>2</sub>e<sup>100</sup> (lire « CO<sub>2</sub> équivalent »), c'est-à-dire qu'1 kg de méthane produit le même forçage radiatif effectif moyen sur 100 ans que 32 kg de CO<sub>2</sub> qui auraient été émis à la place.

Pour l'année 2018, en utilisant la métrique GWP<sub>100</sub>, Lee *et al.* montrent que les émissions équivalent CO<sub>2</sub> de l'aviation (incluant le CO<sub>2</sub> et les effets hors CO<sub>2</sub>, sans prendre en compte la partie amont) s'élèvent ainsi à 1797 Mt CO<sub>2</sub>e, soit 1,7 fois la contribution du CO<sub>2</sub> de combustion seul<sup>101</sup>. La part nette des effets hors CO<sub>2</sub> dans ce chiffre est de 764 Mt CO<sub>2</sub>e, soit 0,7 fois le CO<sub>2</sub> émis en vol. Les effets hors CO<sub>2</sub> des traînées de condensation et des cirrus induits en sont les principaux contributeurs, avec 651 Mt CO<sub>2</sub>e, soit 85 % de l'équivalent CO<sub>2</sub> des effets hors CO<sub>2</sub> et 63% de l'effet du CO<sub>2</sub> seul.

Pour obtenir ces chiffres, Lee *et al.* partent d'une base d'émissions de CO<sub>2</sub> de 1034 Mt CO<sub>2</sub> établie sur la base de l'utilisation de carburant par l'ensemble de l'aviation (aviation civile, militaire et une petite quantité de kérosène vendue mais non consommée)<sup>102</sup>. Elle est supérieure à la quantité d'émissions CO<sub>2</sub> de l'aviation civile, soit 905 Mt CO<sub>2</sub> en 2018, prise comme référence dans ce rapport (voir chapitre 5.7.1). En recalant les chiffres de Lee *et al.* sur cette référence (facteur de 0,875 correspondant au rapport entre

<sup>98</sup> Par « polluant climatique », on entend dans ce rapport les gaz à effet de serre (CO<sub>2</sub>, méthane, vapeur d'eau, ozone...) et les contributeurs aux effets hors CO<sub>2</sub> de l'aviation (oxydes d'azote, nuages anthropogéniques, aérosols, etc.)

<sup>99</sup> Global Warming Potential en anglais, Pouvoir Réchauffant Global ou PRG en français. Cette métrique est utilisée par l'ONU et les différents états dont la France, la DGAC, l'ADEME, la méthode Bilan Carbone®, etc.

<sup>100</sup> Etminan, M., Myhre, G., Highwood, E. J., and Shine, K. P. (2016), Radiative forcing of carbon dioxide, methane, and nitrous oxide: A significant revision of the methane radiative forcing, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 12,614–12,623, doi:10.1002/2016GL071930.

<sup>101</sup> Table 5, colonne GWP100, in Lee *et al.*, 2020, The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018.

<sup>102</sup> Voir annexe A in Lee *et al.*, 2020, The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018.

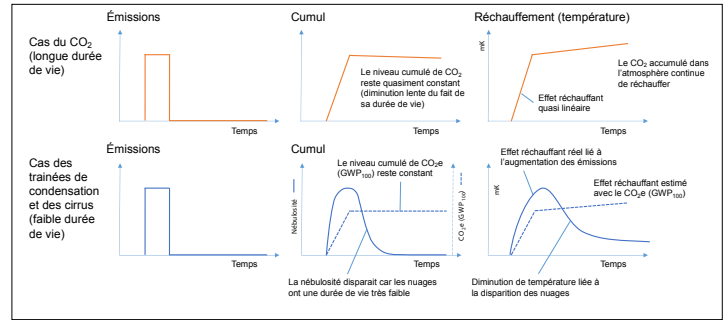
905 Mt et 1034 Mt CO<sub>2</sub>), on obtient les valeurs suivantes : 1,573 Gt CO<sub>2</sub>e (incluant le CO<sub>2</sub> et les effets hors CO<sub>2</sub>, sans prendre en compte la partie amont) ; 668 Mt CO<sub>2</sub>e pour les effets hors CO<sub>2</sub> nets, dont 570 Mt CO<sub>2</sub>e liées aux traînées de condensation et cirrus induits.

**Cependant, comme Lee et al. le mentionnent explicitement dans leur publication<sup>103</sup>, pour les effets hors CO<sub>2</sub> provoqués par l'aviation, ces valeurs ne sont pas représentatives de leur impact climatique réel.** Ils indiquent également que la méthode consistant à évaluer l'équivalent CO<sub>2</sub> des effets hors CO<sub>2</sub> de l'aviation en multipliant les émissions de CO<sub>2</sub> liées à la combustion par une valeur constante calculée avec la métrique GWP<sub>100</sub> n'est pas suffisante pour mettre en évidence les dynamiques temporelles propres à ces émissions hors CO<sub>2</sub>.

En effet, la méthode de calcul associée à la métrique GWP<sub>100</sub> fait que la dynamique de réchauffement induite par les polluants climatiques issus de l'aviation est prise en compte de la même manière que ces polluants climatiques soient à longue durée de vie (ici le CO<sub>2</sub>) ou à faible durée de vie (par exemple les traînées de condensation et les cirrus anthropogéniques, principaux contributeurs aux effets hors CO<sub>2</sub> de l'aviation, qui ne subsistent dans l'atmosphère que quelques heures à quelques jours tout au plus).

Or, ces dynamiques sont radicalement différentes, comme le montre l'exemple présenté ci-après qui permet de comparer entre eux les réchauffements en température provoqués soit par un pic d'émissions de CO<sub>2</sub> (longue durée de vie), soit par un pic d'intensité de traînées de condensation et de cirrus induits (faible durée de vie). Pour ce deuxième pic, l'exemple présente les résultats obtenus en utilisant sa modélisation équivalent CO<sub>2</sub> calculée avec la métrique GWP<sub>100</sub>. Les schémas illustrant l'exemple sont donnés à titre indicatif uniquement : les échelles sont différentes entre chaque graphique, on ne s'intéresse qu'à l'allure des courbes, construites par analogie avec les résultats d'une étude de Lynch *et al.* Issus de modèles climatiques appliqués aux émissions de méthane, autre polluant climatique à faible durée de vie<sup>104</sup>.

Dans le cas du pic d'émissions de CO<sub>2</sub>, l'augmentation de température est quasiment linéaire jusqu'à la fin du pic car le CO<sub>2</sub> s'accumule progressivement dans l'atmosphère. Une fois le pic d'émissions terminé, le CO<sub>2</sub> accumulé<sup>105</sup> continue par la suite de faire augmenter lentement la température, du fait de sa durée de vie importante. Le réchauffement et son amplitude sont provoqués respectivement par l'accumulation du CO<sub>2</sub> liée à sa longue durée de vie et par la quantité de CO<sub>2</sub> accumulée.



**Figure 10 - illustration du comportement climatique induit par un pic des émissions de CO<sub>2</sub> ou par un pic de l'intensité des nuages anthropogéniques causés par l'aviation (traînées de condensation et cirrus induits)**

Dans le cas du pic d'intensité des traînées de condensation et cirrus induits, on observe une forte augmentation initiale du réchauffement induit, suivie d'une forte diminution à l'arrêt des émissions car ces nuages disparaissent rapidement (en quelques jours tout au plus). Ce sont les variations d'émissions de polluants climatiques à faible durée de vie et les niveaux récents de ces émissions qui déterminent la variation de température induite (à la hausse quand les niveaux d'émission augmentent ou à la baisse quand ils diminuent).

L'exemple montre également que si l'on se base sur la métrique GWP<sub>100</sub> pour calculer les équivalent CO<sub>2</sub> instantanés des traînées de condensation et cirrus induits pendant ce pic, puis que l'on cumule ces émissions équivalent CO<sub>2</sub>, on aboutit à un comportement réchauffant de même forme que celui obtenu avec le seul CO<sub>2</sub>. En cas de forte augmentation d'émissions de polluants climatiques à faible durée de vie, la métrique GWP<sub>100</sub> sous-estime donc leur impact climatique car le réchauffement immédiat induit par ces polluants est dans les faits plus rapide et plus important. À l'inverse, en cas de baisse rapide ou arrêt de leurs émissions, la métrique surestime leur impact climatique.

**La métrique GWP<sub>100</sub> ne permettant pas de modéliser correctement l'impact climatique des effets hors CO<sub>2</sub> de l'aviation à court et à long terme, il est donc préférable de s'appuyer sur les dynamiques de réchauffement qu'ils entraînent pour émettre des préconisations en termes d'évolution des émissions des effets hors CO<sub>2</sub> liés à l'aviation plutôt que de les valoriser par un chiffre équivalent CO<sub>2</sub> non représentatif.**

Une métrique différente et qui permet de capturer ces effets transitoires de manière simplifiée, appelée GWP\* (*Global Warming Potential* avec l'astérisque indiquant une amélioration), est utilisée par Lee *et al.* pour calculer le forçage radiatif. Là où le GWP<sub>100</sub> modélise tous les effets, même à courte durée de vie, comme étant proportionnels à l'effet du CO<sub>2</sub> qui lui a une longue durée de vie, une étude de Lynch<sup>106</sup> montre que le GWP\* prend en compte deux effets : la variation récente des émissions, prépondérante, et l'accumula-

103 Voir chapitre 6 in Lee et al., 2020, The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018.

104 John Lynch et al., 2020, Demonstrating GWP\*: a means of reporting warming-equivalent emissions that captures the contrasting impacts of short- and long-lived climate pollutants, Environ. Res. Lett. 15 044023, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab6d7e>

105 La dégradation progressive du CO<sub>2</sub> est représentée sur la courbe de quantité cumulée de CO<sub>2</sub>, ce qui explique sa légère décroissance.

106 J. Lynch, M. Cain, R. Pierrehumbert and M. Allen, Demonstrating GWP\*: a means of reporting warming-equivalent emissions that captures the contrasting impacts of short- and long-lived climate pollutants, Environ. Res. Lett. 15 (2020) 044023, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ab6d7e>

tion au cours du temps, faible<sup>107</sup>.

Le fait de prendre en compte de manière prépondérante les variations des effets à courte durée de vie est crucial. En effet, Lynch montre dans son étude que :

- En cas de forte augmentation des émissions des effets à courte durée de vie, le GWP<sub>100</sub> sous-estime leur effet. C'est le cas de ces dernières années, avec une augmentation exponentielle du trafic aérien et donc de ses effets hors CO<sub>2</sub> à courte durée de vie comme les cirrus.
- En cas de faible augmentation, stagnation, baisse ou arrêt, il les surestime. C'est le cas pour l'année 2020 avec la chute du trafic due à la crise COVID.

Pour illustrer l'impact de ce changement de métrique, voici ce qu'obtient Lee, pour l'année 2018 :

- avec le GWP<sub>100</sub>, l'effet des cirrus a été équivalent à 63% des émissions de CO<sub>2</sub> ;
- avec le GWP\*, l'effet des cirrus a été équivalent à 1,77 fois (177%) les émissions de CO<sub>2</sub>.

Le GWP\* montre que les cirrus ont un effet plus important que ce qui était prévu avec le GWP<sub>100</sub>, à cause de la forte augmentation du trafic aérien d'avant la crise COVID.

Finalement, le GWP\* permet une meilleure représentativité des effets court-termes/long-termes pour les GES à courte durée de vie, respectivement sous-estimés et surestimés par la métrique du GWP<sub>100</sub>.

Malgré l'introduction de cette métrique plus pertinente, il reste que les effets hors-CO<sub>2</sub> sont toujours soumis à de fortes incertitudes, et les scientifiques progressent encore tous les jours dans leur compréhension.

Une des conclusions formulées par Lee *et al.* dans leur publication permet d'identifier les principes associés à ces préconisations : « pour stopper la contribution de l'aviation au réchauffement climatique global, le secteur devra à la fois atteindre la neutralité carbone et faire diminuer le forçage radiatif effectif des effets hors CO<sub>2</sub> [...] : aucune de ces conditions prises séparément n'est suffisante. ».

Il est donc nécessaire de **s'engager dans une réduction rapide de l'intensité des effets hors CO<sub>2</sub>, pour diminuer à brève échéance la contribution immédiate de l'aviation au**

107 D'après l'étude de Lynch, les émissions en CO<sub>2</sub> équivalent (ECO<sub>2</sub>eq) d'un polluant (qu'il s'agisse d'un gaz à effet de serre différent du CO<sub>2</sub> ou des traînées de condensation) sont définies par rapport aux émissions réelles (E) de la manière suivante, pour les deux métriques GWP\* et GWP<sub>100</sub> :

$$\text{GWP}_{100}^* = \frac{E}{k}$$

On reconnaît dans le calcul des émissions équivalentes en CO<sub>2</sub> via le GWP\* le terme qui prend en compte les émissions du moment, celui du GWP<sub>100</sub>, qui va être faiblement pondéré par un petit facteur k (par exemple 10%) et on découvre un nouveau terme qui prend en compte les variations récentes des émissions E sur une période t plus petite que 100 ans (période de référence du GWP<sub>100</sub>), pondérée par un plus gros facteur k' (par exemple 90%).

**réchauffement.** Des pistes sont à ce jour identifiées pour diminuer l'occurrence des traînées de condensation et des cirrus induits<sup>108</sup> (dérouter des avions vers des couloirs aériens ou des altitudes de vol moins propices à la formation de traînées de condensation, éviter les vols en soirée ou la nuit quand ces nuages ont un effet réchauffant, réduire les émissions de particules...) ou pour réduire les émissions de NO<sub>x</sub> mais elles entraînent potentiellement des hausses de consommation, des difficultés dans la gestion de l'espace aérien concerné et des besoins en maturation technologique.

Cependant, comme on l'a vu plus haut, même si on arrivait à éliminer complètement les effets hors CO<sub>2</sub> de l'aviation, c'est bien le niveau de CO<sub>2</sub> accumulé qui conditionne à moyen et long terme le niveau de réchauffement induit par le transport aérien. Il est donc là aussi impérativement nécessaire de **diminuer dès maintenant les émissions de CO<sub>2</sub> de l'aviation pour ralentir le réchauffement induit**, et que cette diminution soit forte et menée dans les deux à trois prochaines décennies.

De plus, pour respecter la première condition énoncée plus haut, **toute mesure décarbonante devra être accompagnée de la vérification soit qu'elle entraîne une réduction des effets hors CO<sub>2</sub>, soit qu'elle évite de les faire augmenter, sur la base des connaissances les plus à jour.** Or, bien que les scientifiques progressent régulièrement dans leur connaissance de ces phénomènes, les incertitudes sur les évaluations des impacts climatiques et sur les mécanismes des effets hors CO<sub>2</sub> restent importantes. **Poursuivre les recherches menées actuellement pour affiner les connaissances sur les effets hors CO<sub>2</sub>**, tout en assurant l'indépendance de leur financement, est donc une quatrième condition fondamentale pour permettre ces vérifications.

**En synthèse, voici donc les chiffres clés et préconisations à retenir concernant la contribution de l'aviation au changement climatique anthropogénique, pour l'année 2018.**

#### Émissions de l'aviation en 2018 (CO<sub>2</sub> seul et CO<sub>2</sub>e calculé selon la métrique GWP<sub>100</sub>)

|                                                                                                                                                                                                                                                                     |                            |                                                                                                                                                                                             |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Combustion seule</b>                                                                                                                                                                                                                                             | 905 Mt CO <sub>2</sub>     | soit 2,1 % des émissions mondiales de CO <sub>2</sub> , incluant la déforestation et le changement d'usage des sols                                                                         |
| <b>Combustion + amont</b>                                                                                                                                                                                                                                           | 1,077 Gt CO <sub>2</sub>   | soit 2,6 % des émissions mondiales de CO <sub>2</sub> , incluant la déforestation et le changement d'usage des sols                                                                         |
| <b>Total équivalent CO<sub>2</sub> (Combustion + amont)</b>                                                                                                                                                                                                         | 1,095 Gt CO <sub>2</sub> e | en prenant en compte l'équivalent CO <sub>2</sub> du CH <sub>4</sub> et du N <sub>2</sub> O émis lors de la combustion et dans la partie amont calculés avec la métrique GWP <sub>100</sub> |
| <b>Nota :</b> en raison de la non-représentativité des valeurs équivalent CO <sub>2</sub> des effets hors CO <sub>2</sub> obtenues avec la métrique GWP <sub>100</sub> , ces valeurs ne sont pas prises en compte dans le total équivalent CO <sub>2</sub> affiché. |                            |                                                                                                                                                                                             |

108 Roger Teoh, Ulrich Schumann, Arnab Majumdar, et al., 2020, Mitigating the Climate Forcing of Aircraft Contrails by Small-Scale Diversions and Technology Adoption, Environ. Sci. Technol. 2020, 54, 5, 2941–2950, <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b05608>

**Forçage radiatif effectif net dû à l'aviation (CO<sub>2</sub> et effets hors CO<sub>2</sub>)**

|                                         |                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|-----------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| CO <sub>2</sub> uniquement (2018)       | 34,3 [28 – 40] mW.m <sup>-2</sup>         | soit 1/3 du forçage radiatif effectif net de l'aviation, lié à l'accumulation progressive du CO <sub>2</sub> dans l'atmosphère, au fur et à mesure des années                                                                                                                                   |
| Effets hors CO <sub>2</sub> (net, 2018) | 66,6 [21 – 111] mW.m <sup>-2</sup>        | soit 2/3 du forçage radiatif effectif net de l'aviation<br><br>le forçage radiatif effectif des traînées de condensation et des cirrus induits est 1,7 fois plus fort que celui du CO <sub>2</sub> . Il est uniquement lié aux nuages apparus dernièrement, du fait de leur faible durée de vie |
| <b>Total net (2018)</b>                 | <b>100,9 [55 – 145] mW.m<sup>-2</sup></b> | calculé entre 1940 et 2018                                                                                                                                                                                                                                                                      |

**Part nette de l'aviation au forçage radiatif effectif anthropogénique :** cette part est de 3,5 [3,4 – 4,0] % du forçage radiatif effectif anthropogénique pour l'année 2011. Il n'est pas possible de calculer cette part pour l'année 2018, l'estimation du forçage radiatif effectif anthropogénique n'ayant pas été réalisée après 2011.

**Principes fondamentaux pour réduire la contribution de l'aviation au réchauffement climatique**

- Diminuer dès à présent et de manière durable les émissions de CO<sub>2</sub> de l'aviation pour ralentir le réchauffement induit, son amplitude étant conditionnée par l'accumulation du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère.
- S'engager dans une réduction rapide de l'intensité des effets hors CO<sub>2</sub>, pour diminuer à brève échéance la contribution immédiate de l'aviation au réchauffement.
- S'assurer systématiquement que toute mesure décarbonante s'accompagne de la vérification qu'elle entraîne une réduction des effets hors CO<sub>2</sub>, ou qu'elle évite de les faire augmenter, sur la base des connaissances les plus à jour.
- Poursuivre les recherches pour affiner les connaissances sur les effets hors CO<sub>2</sub> et permettre les vérifications mentionnées plus haut, en s'assurant de l'indépendance du financement associé pour éviter tout conflit d'intérêt.

## 5.8 Situation du secteur en 2020, impacts de la crise du COVID-19

**Le secteur aéronautique civil connaît la crise la plus grave de son existence.** Ses conséquences pour les compagnies aériennes sont particulièrement visibles. Elles s'étendent désormais à l'ensemble des acteurs du secteur : aviateurs, motoristes, équipementiers, spécialistes de la maintenance et de la réparation, acteurs aéroportuaires et toute leur chaîne de sous-traitants. La crise sanitaire due à la première vague de COVID-19, les restrictions de circulation prises par les États et la résurgence de la pandémie à l'automne 2020 ont entraîné une baisse du trafic aérien mondial sans précédent, avec des conséquences importantes.

### 5.8.1 Un coup d'arrêt brutal à la croissance du trafic aérien

La pandémie de COVID-19 a engendré une diminution importante du trafic aérien, sur l'année 2020 : les principales phases de l'impact sur le trafic sont rappelées ci-dessous.

**Entre mars et mai 2020**, durant la première vague de la pandémie, la plupart des compagnies aériennes en Europe ont annulé plus de 90% de leurs vols du fait des restrictions de déplacement mises en place. Dans le monde, les autres grands marchés domestiques (Australie, Brésil, Chine, États-Unis, Japon, Russie) ont ainsi vu leur trafic chuter de 87% par rapport à avril 2019, avec un trafic international quasi nul<sup>109</sup>.

**Entre mai et jusqu'à fin juillet 2020**, l'évolution de la situation sanitaire a permis une lente reprise du trafic<sup>110</sup> sur les marchés domestiques et sur quelques marchés internationaux. En France, l'aéroport d'Orly, fermé depuis fin mars, a ainsi rouvert le 26 juin<sup>111</sup>, mais avec un trafic très réduit (70 vols contre 600 à 650 en temps normal). En Europe continentale (zone ECAC<sup>112</sup>), les lignes domestiques et internationales ont progressivement rouvert, avec une augmentation du nombre de vols (-61% par rapport à juillet 2019, données EUROCONTROL<sup>113</sup>). Au niveau mondial (données IATA<sup>114</sup>), le trafic était en juillet 2020 en baisse d'un peu moins de 80% par rapport à juillet 2019 (baisse de 92% pour les vols internationaux et de 57% pour les vols domestiques), avec de fortes disparités entre régions (-79% dans la zone de Schengen contre -28% en Chine).

**Cependant, dans le courant du mois d'août 2020**, la dégradation progressive de la situation sanitaire a conduit à un ralentissement de ce début de reprise. Selon les données IATA<sup>115</sup>, le trafic mondial était ainsi stable en septembre 2020 avec une baisse d'un peu moins de 73% par rapport à septembre 2019 (-89% pour les vols internationaux et -43% pour les vols domestiques), contre une baisse d'un peu plus de 75% (88% pour les vols internationaux et -50% pour les vols domestiques) en août 2020 par rapport à août 2019. Les disparités restaient fortes en septembre 2020 entre grandes régions : -76% en Europe contre -2,8% en Chine. En nombre de vols, le trafic sur l'Europe (zone ECAC) était en baisse de 51% en août et de 54% en septembre (données EUROCONTROL<sup>116</sup>).

**Depuis fin septembre**, l'émergence d'une deuxième vague de l'épidémie sur la plupart des pays déjà touchés par la première vague (Chine exceptée) a entraîné la mise en place de

109 IATA, juin 2020, Air Passenger Market Analysis - April 2020: Air passenger demand comes to a standstill amidst lockdowns

110 IATA, 21 avr. 2020, COVID-19 Assessing prospects for domestic markets

111 Le Monde, 26 juin 2020. Après trois mois d'arrêt, un premier avion a décollé de l'aéroport d'Orly

112 ECAC : European Civil Aviation Conference. Instance intergouvernementale, mise en place par l'OACI et le Conseil de l'Europe, comportant 44 États (dont les 41 États membres d'EUROCONTROL).

113 EUROCONTROL, juillet 2020, EUROCONTROL Comprehensive Assessment for Thursday, 30 July 2020

114 IATA, juillet 2020, Air Passenger Market Analysis - July 2020: Limited recovery continues to be driven by domestic markets et

115 IATA, novembre 2020, Air Passenger Monthly Analysis - September 2020: The recovery in passenger travel slows amid elevated risks

116 EUROCONTROL, octobre 2020, EUROCONTROL Comprehensive Assessment for Wednesday, 14 October 2020

nouvelles restrictions de déplacements durant le mois d'octobre dans de nombreux pays, notamment en Europe occidentale. Ces restrictions, ayant duré entre 4 et 6 semaines, ont commencé à être allégées début décembre 2020.

**Le regain de l'épidémie courant décembre 2020 et la propagation de nouveaux variants du virus (Royaume-Uni, Afrique du Sud, etc.) ont entraîné de nouvelles incertitudes, avec de nombreuses restrictions supplémentaires<sup>117</sup>.** Par exemple, près de 900 vols ont été annulés en quelques jours au départ ou à destination du Royaume-Uni à partir du 20 décembre 2020. Les cours en bourse des entreprises du transport aérien et de l'industrie aéronautique ont également chuté en fin d'année. Enfin, courant janvier 2021, l'entrée en vigueur de restrictions supplémentaires freine à nouveau le trafic aérien, en particulier international.

**Au niveau mondial, l'IATA a mesuré une baisse de trafic de 66% sur l'année 2020 par rapport au niveau de RPK de décembre 2019 (-76% pour le trafic international, -50% pour le trafic domestique)<sup>118</sup>, confirmant ses prévisions de novembre<sup>119</sup>.** Ce volume correspond au trafic de 1999. Début février 2021, l'association a publié deux scénarios courts termes pour l'année, dépendant des réponses apportées aux nouveaux variants: le trafic annuel pourrait ainsi augmenter de 13% seulement par rapport à 2020 au lieu de 50% en hypothèse optimiste (Figure 11 ci-dessous).

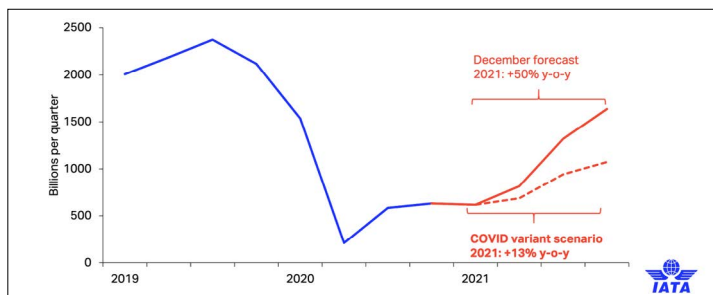


Figure 11 – évolution mensuelle de la variation du trafic en RPK par rapport au mois de l'année précédente, source IATA



Figure 12 – évolution mensuelle du trafic par rapport au mois 2019 correspondant et prévisions court-terme de trafic (en nombre de vols), source EUROCONTROL prévisions court-terme de trafic (en nombre de vols), source EUROCONTROL

117 Les Echos, 21 déc. 2020, Covid : le « lockdown » britannique fait rechuter le transport aérien ; Le Journal de l'Aviation, 21 déc. 2020, La liste des pays qui suspendent les arrivées depuis le Royaume-Uni ; IATA, 29 jan. 2021, IATA Economics' Chart of the Week - Travel restrictions rise amidst new COVID variants

118 IATA, 3 fév. 2021, Air Passenger Market Analysis - December 2020, COVID-19 Week year-end for air travel and outlook is deteriorating

119 IATA, 24 novembre 2020, Airline Industry Economic Performance - November Report - 2020

Au niveau européen, EUROCONTROL a mesuré une baisse du nombre de vols de 55% en 2020. Pour le premier semestre 2021, l'organisation a construit deux scénarios possibles de trafic, comme le montre la Figure 12 ci-dessus)<sup>120</sup>: l'un basé sur une amélioration de la situation durant le deuxième trimestre, l'autre basé sur un statu quo (respectivement, -55% et -70% de vols en juin 2021 par rapport à juin 2019).

**Cette diminution brutale du trafic bouleverse les prévisions du secteur qui tablait, entre 2017 et 2037, sur plus d'un doublement du nombre annuel de passagers de 3,5 à 7 ou 9 milliards<sup>121</sup>.** Désormais, les prévisions du secteur font mention au mieux d'une reprise du trafic en 4 à 5 ans à son niveau de 2019.

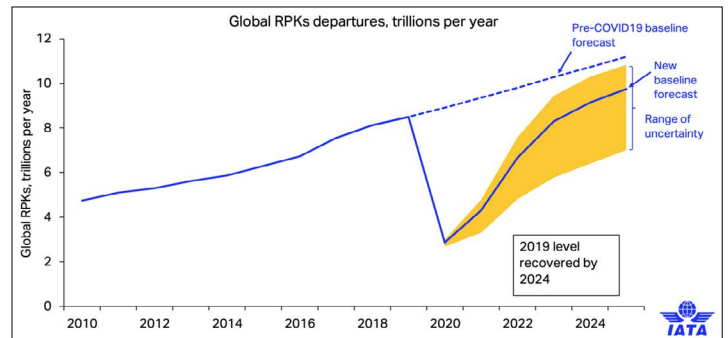


Figure 13 – prévisions de trafic réalisées par l'IATA en novembre 2020<sup>122</sup>

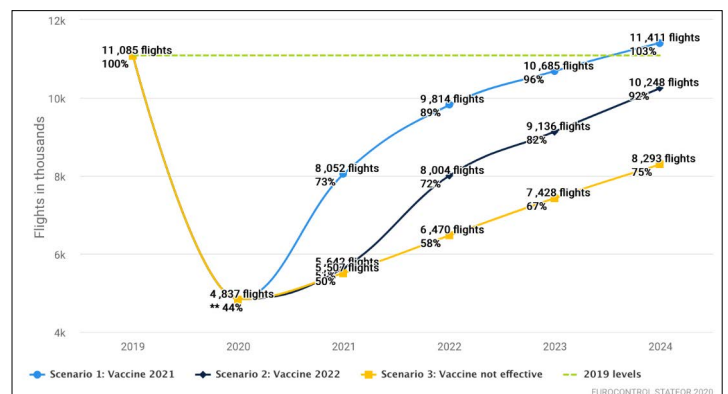


Figure 14 – les trois scénarios EUROCONTROL de reprise du trafic (en nombre de vols) pour la zone ECAC125

Les prévisions de trafic de l'IATA<sup>122</sup> mises à jour en novembre 2020 indiquent que le retour au niveau du trafic mondial 2019 ne se ferait pas avant 2024. Le trafic devrait accélérer fortement en 2021 (4 393 milliards de RPK, soit environ 50% du trafic 2019), puis augmenter plus lentement. Cependant, ces prévisions comportent de fortes incertitudes jusqu'en 2024, comme on peut le voir sur la Figure 13 ci-dessus.

Pour la zone ECAC, EUROCONTROL a identifié trois scénarios de reprise, dépendant de la mise à disposition et de l'efficacité de vaccins contre le SARS-COV2. Ils sont présentés sur la Figure 14 en page 52. Le scénario 1, le plus optimiste avec des vaccins efficaces et déployés largement à mi 2021, indique une reprise du trafic (en nombre de vols) sur la zone ECAC à son niveau de 2019 au mieux en 2024. Le scénario 2,

120 EUROCONTROL, 17 déc. 2020, EUROCONTROL Comprehensive Assessment for Thursday, 17 December 2020

121 IATA, février 2018, IATA Forecast Predicts 8.2 billion Air Travelers in 2037

jugé le plus probable par EUROCONTROL à la date de publication des prévisions, est associé à un vaccin efficace et déployé largement cette fois-ci à mi 2022. Il entraîne un retour plus tardif du trafic au niveau 2019, c'est-à-dire en 2026. Enfin, le scénario 3 est le plus pessimiste, avec un vaccin non efficace et une pandémie rampante. Dans ce scénario, le retour au trafic 2019 se ferait en 2029, soit 10 ans après le début de la crise sanitaire.<sup>122</sup>

### 5.8.2 Une baisse temporaire des émissions annuelles de CO<sub>2</sub> du transport aérien

Avant la crise sanitaire, les émissions de CO<sub>2</sub> du transport aérien étaient en constante augmentation depuis 2009, du fait de la croissance du trafic. Elles s'élevaient ainsi à 905 Mt de CO<sub>2</sub> en 2018, étaient de 914 Mt de CO<sub>2</sub> en 2019 (hors partie amont et effets hors CO<sub>2</sub>), et, dans ses prévisions fin 2019<sup>123</sup>, l'IATA prévoyait qu'elles atteindraient les 936 Mt CO<sub>2</sub> en 2020.

**La crise et la forte diminution associée du trafic aérien ont eu des conséquences visibles sur l'impact climatique du secteur avec une très forte diminution des émissions en 2020**, comme le montre le graphique de l'évolution des émissions depuis 1990 ci-dessous.

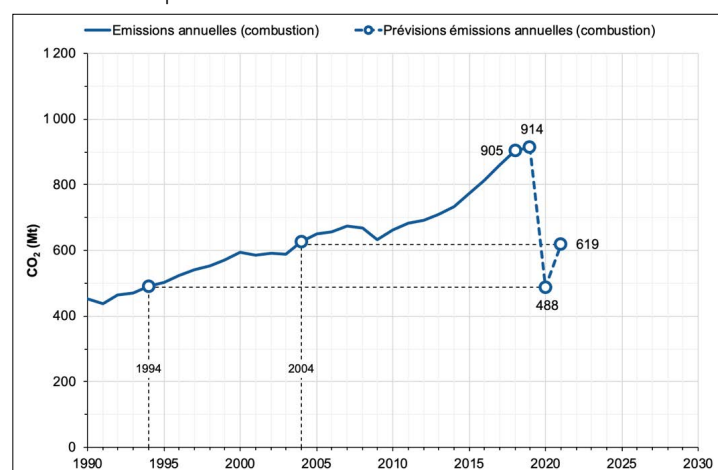


Figure 15 – Évolution des émissions de CO<sub>2</sub> liées au trafic aérien mondial (source IATA<sup>122</sup>)

Dans son rapport de fin d'année 2020<sup>122</sup>, l'IATA prévoit que les émissions annuelles de CO<sub>2</sub> liées au transport aérien seront en très forte baisse, avec 488 Mt CO<sub>2</sub> en 2020, ce qui correspond au niveau de 1994 (diminution de 46% par rapport au niveau 2019 et de 48% par rapport à la prévision initiale pour 2020).

Entre 2019 et 2020, EUROCONTROL indique que les émissions de CO<sub>2</sub> sur la zone ECAC ont baissé de 57% avec des variations importantes entre états membres (en Belgique, le nombre de vols a diminué de 50% par rapport à 2019 mais les émissions de CO<sub>2</sub> n'ont été réduites que de 30% en raison de l'augmentation du trafic cargo)<sup>124</sup>. Le faible niveau de trafic sur la zone a de plus permis d'optimiser l'efficacité des

vols, grâce à des levées de restrictions dans l'espace aérien, entraînant un gain de plus de 26 000 milles nautiques sur les trajets journaliers des avions des compagnies concernées<sup>125</sup>.

En 2021, l'IATA estime que les émissions de CO<sub>2</sub> augmenteront à nouveau pour atteindre 619 Mt CO<sub>2</sub>, soit le niveau de 2004, tout en restant inférieures d'un peu plus de 32% par rapport aux émissions de 2019<sup>122</sup>. Du fait de la baisse constatée du trafic aérien mondial et en fonction de son rythme de reprise estimé par l'IATA (voir Figure 13 en page 51), la réduction des émissions annuelles de CO<sub>2</sub> du secteur par rapport à l'attendu pourrait ainsi se poursuivre au minimum jusqu'en 2024.

Ces réductions resteraient malgré tout temporaires car, si le taux de croissance du trafic aérien reprenait à son rythme d'avant-crise, les émissions de CO<sub>2</sub> tripleraient d'ici 25 à 30 ans<sup>126</sup>.

### 5.8.3 Des flottes en service qui ne seront plus les mêmes

Les compagnies aériennes ont très rapidement adapté leur offre aux restrictions de déplacement, avec le maintien au sol d'une grande partie de leurs flottes d'avions en service. Au fur et à mesure des levées de restrictions, notamment entre juin et septembre, le nombre d'appareils en service a augmenté à nouveau. Cependant, dans son rapport de fin d'année 2020<sup>122</sup>, l'IATA prévoit que la capacité offerte aura baissé d'environ 58% en 2020 par rapport à 2019.

Dans le monde, en novembre 2020, 22 500 avions étaient actifs, contre 9 800 maintenus au sol selon l'IATA<sup>127</sup> (voir Figure 16). Les données EUROCONTROL<sup>128</sup> (voir Figure 17) montrent nettement l'impact de la première vague de la pandémie entre mi-mars et mi-juin 2020 puis l'effet de la deuxième vague épidémique entre mi-septembre et mi-novembre 2020 sur les flottes des compagnies de la zone ECAC.

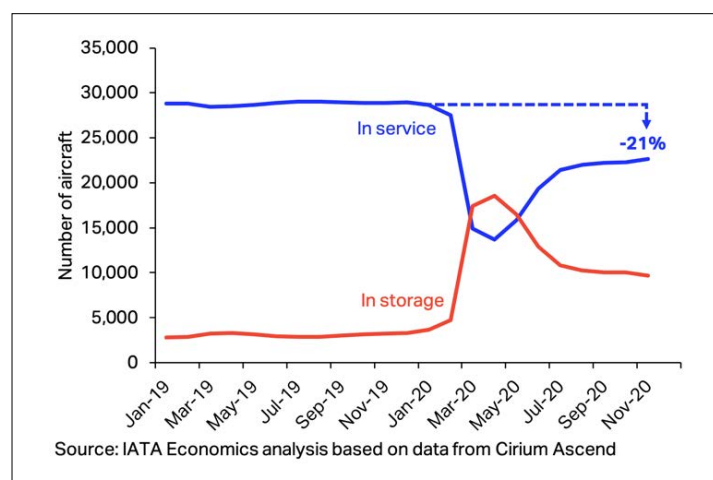


Figure 16 – Proportion d'avions en service et parqués de la flotte mondiale de jets et turbopropulseurs commerciaux<sup>130</sup>

<sup>122</sup> EUROCONTROL, 4 novembre 2020, Five-Year Forecast 2020-2024

<sup>123</sup> IATA, 11 décembre 2019, Airline Industry Economic Performance - December 2019 - Report

<sup>124</sup> EUROCONTROL, 26 jan. 2021, Data Snapshot on CO<sub>2</sub> emissions from flights in 2020

<sup>125</sup> EUROCONTROL, 1er jan. 2021, Think Paper #8 - Impact of COVID-19 on European Aviation in 2020 and Outlook 2021

<sup>126</sup> Carbone 4, oct. 2019, Les émissions de l'aviation internationale pourraient tripler d'ici 2045 et compromettre les objectifs du secteur

<sup>127</sup> IATA, 16 déc. 2020, Airlines Financial Monitor-November 2020

<sup>128</sup> EUROCONTROL, COVID-19 - Grounded aircraft in the EUROCONTROL area

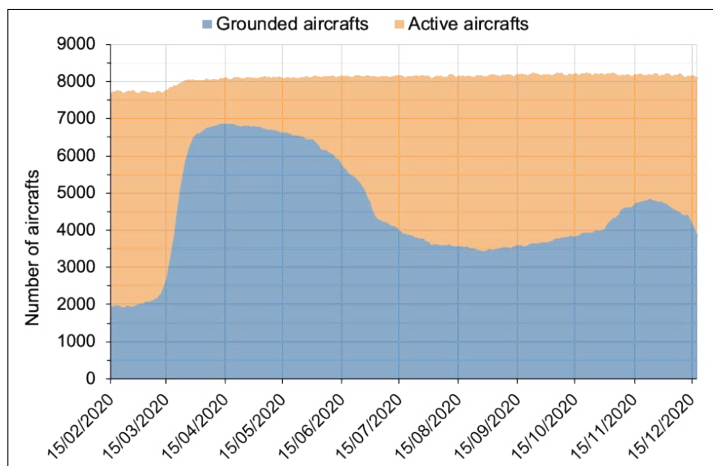


Figure 17 – Évolution du nombre d'avions actifs et parqués depuis février 2020 sur la zone ECAC (source EUROCONTROL<sup>131</sup>)  
février 2020 sur la zone ECAC (source EUROCONTRO

**La crise a été pour plusieurs compagnies l'occasion d'arrêter définitivement l'exploitation de certains avions parmi les plus anciens de leurs flottes en raison de leur consommation et de leurs coûts plus élevés de maintenance.** L'IATA prévoit ainsi que la flotte d'avions actifs aura diminué de 17,5% en 2020<sup>122</sup>. Les retraits du service devraient se poursuivre en 2021 et concerner 8% des flottes<sup>129</sup>. Certains types d'avions, comme le Boeing 777, sont particulièrement concernés<sup>130</sup>. Delta Airlines a finalisé en décembre 2020 le retrait de sa flotte de la totalité des exemplaires qu'elle possédait, avec un remplacement progressif par des A350.

**Plusieurs compagnies ont également anticipé le retrait du service de leurs très gros porteurs, difficiles à rentabiliser.**

Air France a ainsi annoncé en mai 2020 le maintien définitif au sol de ses neufs Airbus A380. Lufthansa a également décidé d'avancer la date de revente de ses six A380<sup>131</sup>. Seules quelques compagnies exploitent encore des flottes importantes d'A380, comme par exemple Emirates avec 115 avions. British Airways a, de son côté, décidé de ne pas refaire voler ses trente et un Boeing 747<sup>132</sup>. Virgin Atlantic a aussi retiré du service l'intégralité de ses Boeing 747.

**Enfin, dès mars 2020, de nombreuses compagnies aériennes ont soit annulé des commandes, soit négocié un report des livraisons de nouveaux appareils pour ralentir leur consommation de trésorerie, (l'essentiel du paiement de l'avion se faisant au moment de sa réception).** Exemple parmi d'autres, EasyJet a modifié 15 dates de livraisons d'A320neo pour qu'elles aient lieu entre 2022 et 2024 et a repoussé à 2027 et 2028 les livraisons de 22 autres appareils qui étaient initialement prévues entre 2022 et 2024 pour ne pas avoir à réceptionner d'avions en 2021, sans annuler de com-

mandes<sup>133</sup>. Fin juin 2020, Norwegian a annulé la commande de 92 Boeing 737 MAX et de 5 Boeing 787<sup>134</sup>. Selon l'IATA, moins de la moitié des livraisons prévues au début de l'année 2020 auront été effectuées, soit 800 appareils<sup>130</sup>. Le nombre de livraisons devrait remonter en 2021, autour de 1 300 appareils, soit le nombre réalisé en 2019.

**La crise accélère ainsi des changements déjà engagés depuis quelques années, avec la fin planifiée des quadricopteurs dans l'aviation commerciale et la montée en puissance des biréacteurs.** Les avionneurs ont depuis plus d'un an adapté leur catalogue à cette transformation. Airbus avait annoncé l'arrêt de la production de l'A380 dès février 2019<sup>135</sup>. Boeing a, quant à lui, indiqué en juillet 2020 que la production du 747 allait être arrêtée en 2022<sup>136</sup>. D'ici deux à trois ans, les long-courriers proposés par les avionneurs seront donc exclusivement des biréacteurs, souvent de conception plus récente, moins gourmands en carburant, comme l'Airbus A350-900, le Boeing 787 et, dans un futur proche et afin d'offrir plus de flexibilité aux compagnies, des monocouloirs à long rayon d'action comme l'Airbus A321 XLR et le Boeing 737-10<sup>137</sup>.

**Malgré la crise, Airbus<sup>138</sup> et Boeing<sup>139</sup> continuent à afficher des perspectives de forte croissance à 20 ans dans leurs études de marché, toutefois révélatrices des changements évoqués plus haut.** Les deux avionneurs annoncent l'accélération du renouvellement des flottes sur les dix ans à venir, à l'inverse de la tendance observée durant les dix dernières années où les nouveaux appareils s'ajoutaient essentiellement aux flottes existantes. Airbus estime ainsi que la taille de la flotte mondiale sera en 2038 d'un peu moins de 45 000 appareils (24 000 appareils supplémentaires par rapport à 2018, nécessitant environ 39 000 livraisons) ; Boeing évalue quant à lui que le nombre d'appareils en service dans le monde augmentera de 3,2% par an d'ici à 2039, avec un besoin de plus de 43 000 livraisons.

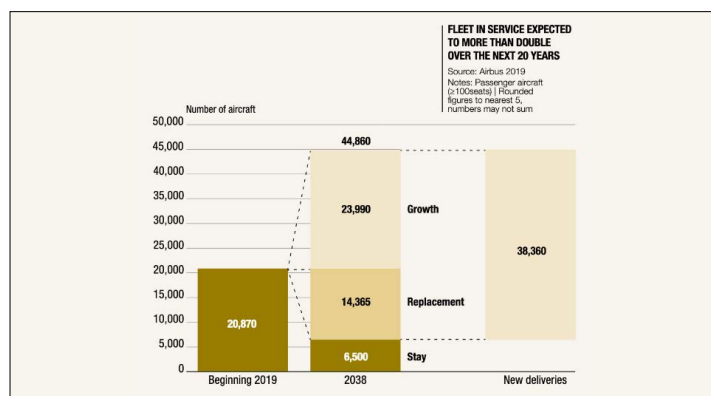


Figure 18 – prévisions à 20 ans Airbus

133 Le Journal de l'Aviation, 22 déc. 2020, Easyjet repousse ses livraisons d'Airbus A320neo de plusieurs années

134 Le Monde, 30 juin 2020, La compagnie Norwegian annule une commande de près d'une centaine d'avions Boeing

135 Le Monde, 14 février 2019, Airbus annonce la fin de l'A380

136 Les Echos, 29 juillet 2020, Boeing sonne le glas de son mythe 747

137 Les Echos, 21 août 2020, Coronavirus : les flottes d'avions ne seront plus les mêmes

138 Les Echos, 7 oct. 2020, Airbus juge prématuré de modifier ses prévisions de marché ; Airbus, 18 sept. 2019, Global Market Forecast

139 Les Echos, 6 oct. 2020, Malgré la crise, Boeing prévoit toujours le doublement de la flotte mondiale sur 20 ans ; Boeing, 18 nov. 2020, Commercial Market Outlook 2020-2039

129 IATA, 27 oct. 2020, Can costs be downsized to make the industry cash positive

130 Le Journal de l'Aviation, 1er déc. 2020, Le Triple Sept, prochaine grande victime de la crise

131 Le Monde, 21 mai 2020, Trop cher, trop polluant, pas assez rentable : Air France abandonne l'Airbus A380

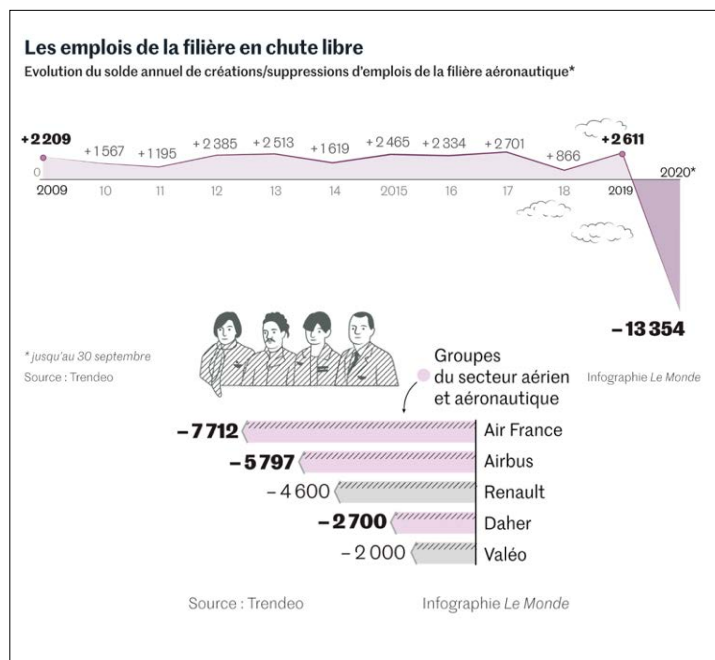
132 Les Echos, 17 juillet 2020, Le mytique Jumbo Jet de Boeing fait ses derniers tours de piste ; Le Journal de l'Aviation, 14 déc. 2020, British Airways fait ses adieux à son dernier Boeing 747 ; Air Journal, 22 déc. 2020, Le dernier 747 de Virgin Atlantic est parti



Figure 19 – Prévisions à 20 ans Boeing

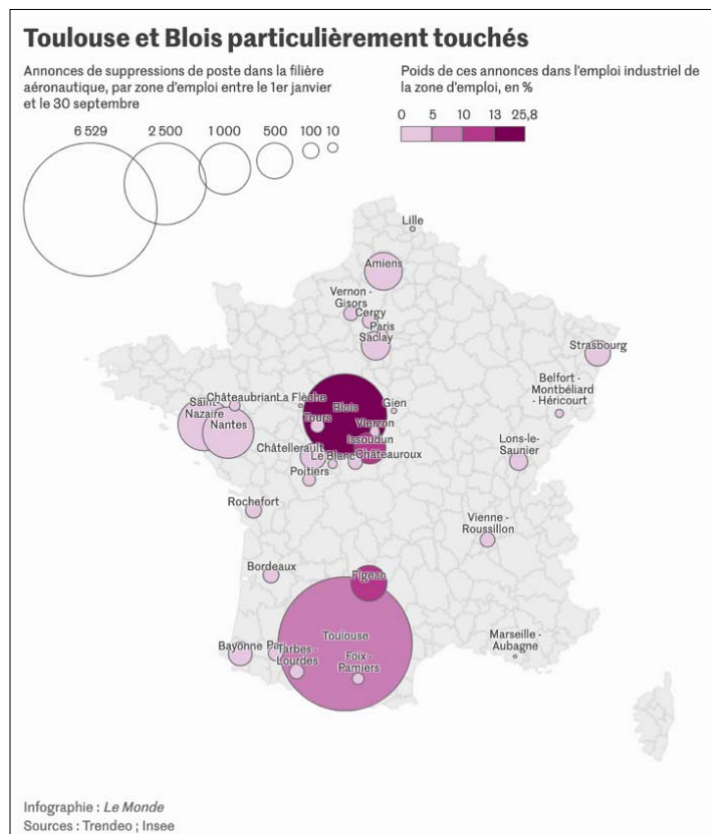
### 5.8.4 Des impacts économiques et sociaux importants

Toutes les entreprises du secteur sont touchées, avec des risques de faillites en cascade, de pertes d'emplois et de savoir-faire uniques. On estime que 10 millions d'emplois directs et 65 millions d'emplois indirects sont concernés dans le monde<sup>140</sup>. Les impacts sont très importants en France : l'observatoire Trendeo de l'emploi et de l'investissement estimait début octobre 2020 que le premier semestre avait effacé les gains en emplois des dix dernières années sur le territoire national. Plus de 13 000 postes supprimés ou en cours de suppression, contre un solde net de près de 12 000 emplois créés à mi-mars<sup>141</sup>. L'adaptation de PSE grâce aux aides de l'état aura toutefois permis depuis de réduire légèrement ces chiffres.



140 IATA, 14 avril 2020, Remarks of Alexandre de Juniac at the IATA Media Briefing on COVID-19, 14 April 2020

141 Le Monde, 5 oct. 2020, En six mois, le secteur de l'aéronautique a perdu la totalité des postes créés entre 2009 et 2019

Figure 20 : infographies illustrant les impacts sur les emplois de la filière aéronautique en France (source Le Monde<sup>144</sup>)

#### 5.8.4.1 Impacts pour les compagnies aériennes

**La crise devrait rebattre les cartes du marché du transport aérien dans les prochaines années, avec des pertes totales de 118,5 milliards de dollars en 2020 et une perte de chiffre d'affaires annuel liée à la baisse du trafic aérien qui s'est élevée à 510 milliards de dollars, selon l'IATA<sup>142</sup>.**

Pour y faire face, les compagnies aériennes ont engagé depuis mars 2020 des plans d'économie (décalage de livraisons, réduction de la taille des flottes, gel ou réduction des salaires, etc.), mené plusieurs vagues de suppressions de postes, et, pour certaines, bénéficié de plans de soutien mis en place par différents états (essentiellement aux Etats-Unis et en Europe). L'IATA estimait fin novembre 2020 que leur consommation de cash devrait se poursuivre à minima jusqu'au troisième trimestre 2021, avec une inversion potentielle lors du quatrième trimestre<sup>142</sup>. Ce scénario reste cependant soumis à l'évolution de la situation sanitaire mondiale et à la levée progressive des restrictions de déplacements. De nombreuses compagnies aériennes dans le monde sont ainsi toujours à risque de manquer de liquidités à très court terme avec des questionnements importants sur leur viabilité à terme.

**Plusieurs faillites ou mises sous des régimes de protection ont ainsi déjà eu lieu, concernant parfois des compagnies majeures ou historiques.** Virgin Australia est la première compagnie à s'être déclarée en cessation de paiement, le 21 avril 2020<sup>143</sup>. Les deux plus importantes compagnies sud-amé-

142 IATA, 27 nov. 2020, IATA Economics' Chart of the Week - Vaccines may bring end to cash burn by the end of 2021

143 Le Monde, 21 avril 2020, Coronavirus : la compagnie aérienne Virgin Australia se déclare en cessation de paiements

ricaines, LATAM (Chili / Brésil) et Avianca (Colombie), se sont placées courant mai 2020 sous la protection du chapitre 11 de la loi sur les faillites des États-Unis, pour se restructurer<sup>144</sup>.

**Après un an de crise, la situation reste très difficile pour les grandes compagnies nationales, dont les revenus ont fortement chuté, suivant la quasi-absence de trafic international et la perte de leur clientèle d'affaires.** Les grandes compagnies européennes (dont British Airways, Lufthansa, Air France-KLM et leurs filiales) ont ainsi enregistré en 2020 des pertes très élevées, qui auraient pu les mener à la faillite sans le soutien de leurs pays d'origine. Outre atlantique, Air Canada en revanche, tout comme les autres compagnies canadiennes, n'a toujours pas bénéficié d'un plan d'aide gouvernemental, et son avenir demeure incertain. Les suppressions de postes se comptent en plusieurs dizaines de milliers. Ces compagnies, souvent historiques dans l'histoire de l'aviation commerciale, seront sans doute obligées de se réinventer à l'issue de la crise, peut-être pour devenir « plus minces et plus petites » comme l'indiquait le PDG de Lufthansa en janvier 2021. Elles risquent également, pour celles qui ont bénéficié d'aides d'états de l'Union Européenne, notamment Air France-KLM et Lufthansa, d'avoir à fournir des contreparties sous la forme de cessions de créneaux aéroportuaires, ce qui pourrait encore plus les fragiliser<sup>145</sup>.

**Les compagnies low-cost ayant basé leur développement sur les voyages transatlantiques ont, elles, vu leur modèle économique s'effondrer en moins d'un an et recentrent leurs activités.** C'est le cas par exemple de la compagnie scandinave Norwegian, actuellement sous protection de la loi des faillites, et de la compagnie Virgin Atlantic (dont le trafic transatlantique représentait 70% de l'activité), qui devrait, elle, rester en mesure de passer l'année 2021 grâce à des levées de fonds.

**À contrario, aux États-Unis, les quatre principales compagnies aériennes (American Airlines, United Airlines, Delta Air Lines et Southwest) conservent la confiance des investisseurs, qui « croient toujours en l'avenir des grandes compagnies », en raison de leur exposition moindre au trafic international et long-courrier, de leur rentabilité avant crise et de la valorisation de leurs programmes de fidélité.** Elles ont pourtant enregistré en 2020 une chute de chiffre d'affaires de 65% en moyenne, et des pertes nettes abyssales, à hauteur de 31,5 milliards de dollars<sup>146</sup>. Leur faillite a malgré tout été évitée grâce aux aides importantes reçues de l'état américain (25 milliards de dollars en mars 2020 suivis de 15 milliards en décembre, auxquels pourraient s'ajouter 17 milliards en 2021) et aux 30 mil-

liards de dollars de fonds levés<sup>147</sup>. Les restructurations engagées sont drastiques : la fédération Airlines for America, représentant les compagnies aériennes américaines, a estimé que 90 000 emplois, soit 20% des effectifs du transport aérien américain pourraient être supprimés<sup>148</sup>.

**En Europe, ce sont les compagnies low-cost RyanAir, EasyJet et Wizz Air qui réussissent à limiter l'impact de la crise et à préserver des atouts en vue d'une reprise du trafic :** leur modèle économique ne repose pas sur les vols long-courriers ou les revenus des classes affaires et elles disposaient avant-crise d'une trésorerie largement plus importante que leurs concurrentes. Elles ont aussi profité de la crise pour mener des politiques très agressives, à la fois sur le plan social, avec plus de 8 000 postes supprimés et des baisses de salaires entre 10 et 14% en moyenne, et sur le plan commercial (RyanAir renégocie les frais aéroportuaires, les achats, ses locations d'avions ; Wizz Air étend et densifie son réseau, voir annexes)<sup>149</sup>.

#### 5.8.4.2 Impacts dans l'industrie aéronautique

**Les prévisions de trafic pessimistes, les reports et annulations de livraisons par les compagnies aériennes (800 réalisées contre 2 000 planifiées initialement<sup>150</sup>, (voir Figure 21) ont entraîné dès mars 2020 une adaptation des rythmes de production des avionneurs (Airbus, Boeing, Embraer<sup>150</sup>, etc.).**

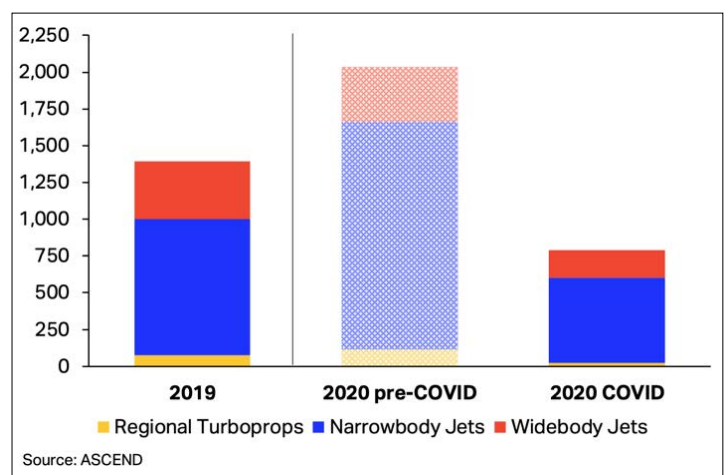


Figure 21 – Comparaison des livraisons d'appareils en 2019 et 2020 (prévues avant crise COVID et effectives)<sup>149</sup>

Cette baisse de cadences s'est ensuite répercutée sur les motoristes et équipementiers (General Electric, Pratt & Whitney, Rolls-Royce<sup>151</sup>, Safran, etc.) et enfin, par ricochet, sur

144 Challenges, 11 mai 2020. Coronavirus : Ruinée par la crise, la compagnie aérienne Avianca fait faillite ; Ouest France, 27 mai 2020. La compagnie aérienne LATAM s'effondre à la Bourse, le Chili étudie un plan de sauvetage  
145 Les Echos, 4 fév. 2021, Front uni chez Air France-KLM contre les exigences de Bruxelles

146 12,4 milliards pour Delta Air Lines, 8,9 milliards pour American Airlines, 7,1 milliards pour United Airlines et 3,1 milliards pour Southwest. Source : Les Echos, 14 jan. 2021, Delta Air Lines tombe de haut, avec une perte record de 12 milliards de dollars ; Les Echos, 21 jan. 2021, Avec le Covid, United a perdu 7 milliards de dollars en 2020 ; Les Echos Investir, 28 jan. 2021, Lourdes pertes annuelles pour American et Southwest Airlines

147 Les Echos, 26 mar. 2020, Les compagnies aériennes américaines obtiennent une aide de 58 milliards de dollars ; L'Usine Nouvelle, 21 décembre 2020, USA : Le plan de relance prévoit 15 milliards de dollars d'aide à l'aérien ; Les Echos, 29 jan. 2021, Pour les compagnies aériennes américaines, le Covid-19 est pire que le 11 septembre

148 Site internet Airlines for America ; Les Echos, 13 nov. 2021, Covid-19 : le secteur aérien américain pourrait perdre 90.000 emplois Les Echos, 4 fév. 2021, Covid : 13.000 salariés d'American Airlines menacés de licenciement

149 Le Monde, 6 août 2020, La bonne fortune des compagnies aériennes low cost ; Les Echos, 2 nov. 2020, Covid : Ryanair continue de survoler la crise

150 Embraer est l'avionneur brésilien, produisant des avions civils et militaires.

151 Rolls-Royce Holding plc : groupe constitué des divisions aéronautiques, génération de puissance, nucléaire et data. Il correspond à l'ancienne branche aéronautique de l'entreprise Rolls-Royce originelle, séparée depuis 1971 de la branche Motorcars.

toute la chaîne de leurs sous-traitants. Les résultats 2020 sont en forte diminution par rapport à 2019, avec, pour la grande majorité des acteurs, des pertes opérationnelles très importantes et par la suite des plans de réductions de dépenses et de suppressions de postes.

Les deux principaux avionneurs (Airbus et Boeing) ont mis en place des mesures d'adaptation complémentaires dès mars 2020, avec la levée de lignes de crédit, le recours aux dispositifs d'activité partielle et des plans agressifs de réduction des dépenses. Airbus a en outre annoncé en juin 2020 la suppression de près de 15 000 postes, Boeing de 30 000. Ce dernier, déjà fragilisé en 2019 par l'interdiction de voler du 737 MAX, a connu en 2020 la pire année de son histoire, avec des pertes nettes de 11,9 milliards de dollars et 157 livraisons d'avions seulement. Airbus quant à lui, subit une perte nette de presque 3 milliards d'euros sur les 9 premiers mois 2020 et livré 566 appareils.

**Du côté des motoristes et équipementiers, la crise s'est propagée sur deux axes, impactant le chiffre d'affaires en première monte et les revenus des contrats de support à l'heure de vol.**

Les annulations et les reports de livraisons par les compagnies ont diminué ou retardé les rentrées d'argent, le paiement des moteurs et équipements neufs s'effectuant en général lors la livraison de l'appareil, comme pour les avionneurs. La chute du trafic et le maintien au sol de nombreux avions n'ont de plus pas permis d'enregistrer les revenus attendus des contrats de soutien à l'heure de vol, constituant une part de plus en plus importante de leur modèle économique. L'équipementier et motoriste britannique Rolls Royce est particulièrement impacté, du fait de son centrage sur les moteurs à forte puissance (pour les longs courriers) et de la large prépondérance des contrats à l'heure de vol dans ses revenus. Avec là aussi des pertes importantes attendues, General Electric, Rolls Royce et Safran, ont donc dès le début de la crise engagé des actions de réduction de coûts, incluant notamment la diminution de leurs achats de matières premières et de sous-traitance, la rationalisation de leur supply-chain et près de 42 000 suppressions de postes au total. Ces suppressions d'emploi, avec le risque de pertes de compétences clefs et expertises acquises difficilement par le passé, font peser une menace importante sur la décarbonation du secteur, les moteurs et les équipements étant parmi les vecteurs principaux de l'optimisation de l'efficacité énergétique des aéronefs.

**Les très nombreux sous-traitants industriels de la filière ont ainsi subi de plein fouet la baisse de la demande provenant des grands donneurs d'ordres du secteur, avec une multiplication de plans sociaux ou de départs volontaires et de recours à l'activité partielle<sup>152 153</sup>, notamment en France.**

Des entreprises de taille intermédiaire (ETI) cruciales pour la filière, comme Latécoère, Figeac Aero, Mécachrome, SKF, Aubert & Duval, fournissant des aérostructures, des systèmes d'interconnexion, des pièces, équipements et sous-ensembles mécaniques, et des matériaux métallurgiques à haute performances, ont connu une année désastreuse, après des années

d'investissement pour répondre à la montée en cadence demandée par leurs donneurs d'ordres. Elles ont dû adapter leur outil de production, rationaliser leurs sites et ont supprimé des centaines de postes en France. Ces exemples ne retracent toutefois que très partiellement la situation de l'ensemble des sous-traitants industriels français de la filière, essentiellement des TPE et PME<sup>154</sup>. En Occitanie, 71 entreprises régionales ont ainsi déposé un PSE, menaçant la pérennité de 7 000 à 8 000 emplois, selon l'Union des Industries et Métiers de la Métallurgie. L'État et les Régions ont mis en œuvre depuis le milieu d'année 2020 des mesures pour favoriser la consolidation de la filière, soutenir financièrement ses entreprises et aider à la diversification de leurs activités<sup>155</sup>. Enfin, en décembre 2020, un dispositif complémentaire de prêts garantis par l'État, le « PGE Aéro », a été instauré avec le soutien d'Airbus à destination des sous-traitants aéronautiques. Ils pourront emprunter jusqu'à deux fois la valeur moyenne de leurs stocks sur les deux derniers exercices et faire racheter leurs surstocks par une plateforme de portage qui les leur revendrait au fur et à mesure des appels d'approvisionnement. Ces mesures pourraient les aider à franchir les difficultés auxquelles ils sont confrontés. De nombreuses sociétés affichent désormais leur volonté de réussir à tenir dans la durée et de se diversifier pour devenir plus résilientes face aux crises et aux aléas<sup>156</sup>.

**À leur tour, les entreprises de services et d'ingénierie françaises sont en train de mettre en œuvre des mesures drastiques d'adaptation à la situation (APLD, PSE, etc.), face à un horizon de reprise qui s'éloigne et à la réduction des dépenses mises en œuvre par les donneurs d'ordres du secteur.** C'est le cas en particulier en région Occitanie, où 8 à 10 000 ingénieurs étaient sans mission au début du mois de juillet 2020 (voir en annexe les exemples des sociétés Sogecair Aerospace SAS, Assistance Aéronautique Aérospatiale, Akka Technologies, Expleo Altran et Alten Sud-Ouest). Ces mesures, outre les conséquences directes ou indirectes sur les économies locales et sur le plan humain, créent un risque sur les futurs programmes de recherche et de développement annoncés par les avionneurs et motoristes pour décarboner le transport aérien. Comme l'indique le président de Syntec-Ingénierie, « on ne peut pas développer un avion sans l'aide des ingénieurs. [...] ils font partie intégrante de la chaîne »<sup>159</sup> et les compétences perdues seront parfois difficiles à réacquérir<sup>156</sup>.

**Enfin, l'optimisation approfondie de l'utilisation des flottes des compagnies a accentué la baisse des revenus des multiples acteurs MRO, déjà pénalisés par la diminution du trafic.** En retirant temporairement ou définitivement

154 Le Monde, 15 mai 2020, « Soit on s'adapte, soit on meurt » : en Occitanie, les sous-traitants de l'industrie aéronautique résistent ; Le Monde, 1er juil. 2020, En Occitanie, les sous-traitants de la filière aéronautique retiennent leur souffle ; Le Monde, 22 déc. 2020, « La crise nous oblige à nous réinventer » : comment les sous-traitants de l'aéronautique résistent

155 Les Echos, 23 déc. 2020, Covid : nouvelles aides pour les sous-traitants de l'aéronautique ; Ministère de l'Economie, des Finances et de la Relance, 23 déc. 2020, Bruno Le Maire annonce le lancement des PGE « Aéro », et la conclusion d'un premier financement d'envergure, soutenu par Airbus, au bénéfice des fournisseurs de la filière aéronautique ; Le Journal de l'Aviation, 23 déc. 2020, Avec le lancement des PGE « Aéro », l'État renforce son aide aux fournisseurs de la filière aéronautique

156 Le Monde, 4 juil. 2020, Les ingénieurs, victimes collatérales de l'aéronautique en crise

152 Le Monde, 30 juil. 2020, Aéronautique : autour de Toulouse, le feu couve au sein des sous-traitants

153 Les Echos, 29 oct. 2020, Les syndicats de l'aéronautique dénoncent un abus des plans sociaux

vement du service les avions les plus anciens ou nécessitant une rénovation générale à brève échéance, et en échangeant des moteurs ou des équipements entre avions pour utiliser ceux possédant le potentiel d'utilisation le plus long avant révision complète, elles ont fait chuter les ventes de pièces de rechange (souvent produites par les motoristes et équipementiers) et les rentrées d'argent liées à aux opérations de maintenance (notamment en ateliers). Le marché du retrofit de cabines devrait lui aussi rester largement affecté par les conséquences de la crise sur les prochaines années, avec une baisse attendue de 50% des investissements des compagnies aériennes sur la période 2021 à 2025<sup>157</sup>.

#### 5.8.4.3 Impacts pour les acteurs aéroportuaires

**La situation a déstabilisé le modèle de financement des aéroports (notamment en France<sup>158</sup>), ainsi que l'économie et les emplois dans les territoires limitrophes<sup>159</sup>. Elle risque, selon l'association des aéroports européens, de conduire près de 200 aéroports à la faillite<sup>160</sup>.** En effet, les aéroports et les entreprises connexes (sociétés de traitement en escale, de sécurité, services, hôtellerie, commerces, etc.) sont aussi confrontés à une baisse drastique de leurs ressources. Les raisons principales en sont l'absence de rentrée de redevances aéroportuaires et la baisse d'activité en lien avec la chute du trafic. Le faible nombre de passagers en transit impacte également les commerces installés dans les terminaux des aéroports avec une baisse importante de chiffre d'affaire et une réduction de l'attractivité des infrastructures commerciales. Or, ce chiffre d'affaire est une source importante de revenus pour les gestionnaires d'aéroports<sup>161</sup>.

De grands investissements d'augmentation de capacité ont été reportés d'au moins deux à trois ans, voire carrément annulés, renforçant les impacts économiques sur les territoires et sur d'autres filières. Le projet du nouveau terminal 4 à Roissy Charles De Gaulle, jugé désormais « obsolète » et incompatible avec la politique environnementale menée par la France, a été ainsi officiellement abandonné dans sa forme actuelle début février 2021<sup>162</sup>.

## 5.9 Quelles projections carbone pour le secteur ?

### 5.9.1 Les objectifs fixés par le secteur pour le trafic international

**Dès 2009, le secteur aérien, via l'ATAG, s'est fixé un objectif de réduction des émissions du trafic aérien internatio-**

**nal de 50% en 2050 par rapport à son niveau de 2005.** Cet objectif doit être atteint grâce à :

- L'amélioration de la performance énergétique continue, entre 1,5 et 2% par an ;
- La compensation (CORSIA) devant permettre de « stabiliser » les émissions à partir de 2020 (revu à 2019 suite à la crise COVID) ;
- La montée en puissance de l'utilisation de carburants alternatifs.

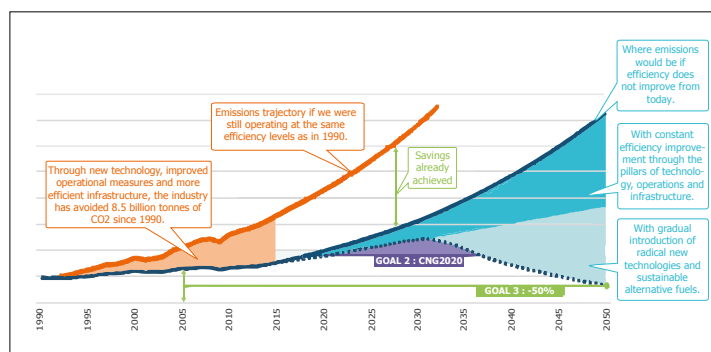


Figure 22 - Graphique issu de « 2019 Environmental Report » de l'OACI (p174)<sup>163</sup>, illustrant les engagements de l'industrie

Cet objectif est remarquable car peu d'autres secteurs se sont engagés de cette façon au niveau international. Il est également très ambitieux, mais dans quelle mesure est-il compatible avec un budget carbone « +2°C » ?

Entre 2005 et 2019, l'amélioration énergétique a été constatée au-delà de l'objectif initial, avec notamment la mise en service des avions de dernière génération : famille A320 NEO, A330 NEO, A350, B737 MAX et B787. Pour autant, la croissance du trafic a été telle que les émissions de CO<sub>2</sub> ont largement augmenté. Entre 2000 et 2018, le nombre de passagers-équivalents-kilomètres-transportés a augmenté de 62 % en France et la croissance des émissions de CO<sub>2</sub> du transport aérien a été de 21%, et ce malgré une diminution de 25% des émissions de CO<sub>2</sub> unitaire (en kg de CO<sub>2</sub> par passager équivalent kilomètre transporté). Entre 2017 et 2018 les émissions du secteur aérien en France ont augmenté de 3,8%, pour s'élever à 27 MtCO<sub>2</sub>, émissions amont incluses.

Le secteur aérien a lui-même constaté ces tendances, et en 2019, l'OACI prévoyait que, hors plan de réduction majeur, les émissions des vols internationaux seraient multipliées par un facteur allant d'environ 2,5 à environ 4 d'ici 2050, en abaissant la prévision d'amélioration de performance à 1,37% (hors rupture technologique majeure) répartis entre l'amélioration des performances avion (0,98%/an) et l'amélioration des opérations air et sol (0,39%/an). L'OACI (via le CAEP) a alors réestimé la trajectoire comme suit :

157 Le Journal de l'Aviation, 8 oct. 2020, [Le marché du retrofit de cabine pourrait être réduit de moitié jusqu'en 2026](#)

158 Les Echos, 2 sept. 2020, [Aérien : la crise remet en cause le modèle des aéroports français](#)

159 Le Journal de l'Aviation, 31 déc. 2020, [Aéroport de Roissy-Charles-de-Gaulle : la crainte d'une « catastrophe sociale »](#)

160 Les Echos, 17 novembre 2020, [Deux cents aéroports européens au bord de la faillite](#)

161 Les Echos, 1er dec. 2020, [A Orly et Roissy, le Covid plombe les commerces de luxe des aéroports](#)

162 Les Echos, 11 fev. 2021, [Le gouvernement enterre le projet d'extension de Roissy, devenu « obsolète »](#)

163 [https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/ICAO-ENV-Report2019-F1-WEB%20\(1\).pdf](https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/ICAO-ENV-Report2019-F1-WEB%20(1).pdf)

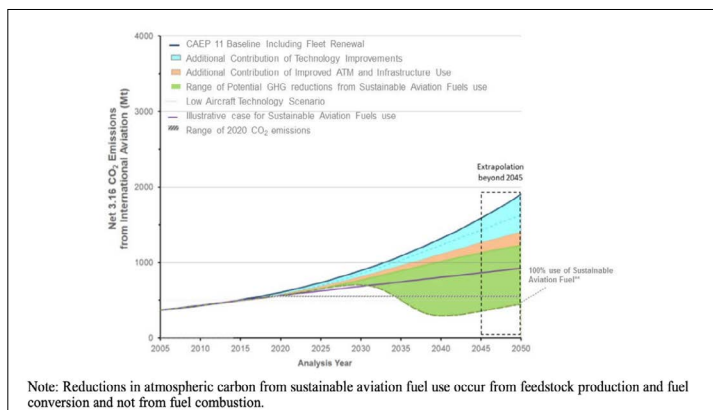


Figure 23 – Tendence prévue par le CAEP, extrait du Compte Rendu du Comité Exécutif OACI de 2019<sup>164</sup>

Cette tendance diffère de celle de l'ATAG de 2009. Elle indique que, malgré les évolutions technologiques prévisionnelles et l'utilisation de 100% de SAF en 2050, le point d'arrivée est environ au niveau de 2005 (et non à 50% du niveau de 2005). L'objectif de l'ATAG ne serait donc pas tenu dans ces hypothèses. Nous pouvons voir par ailleurs que la compensation CORSIA ne serait effective qu'entre 2020 et environ 2034, ensuite les émissions sont en dessous du niveau de 2020 grâce aux carburants alternatifs.

- Les émissions internationales en 2005 étant d'environ 650 MtCO<sub>2</sub>eq<sup>165</sup> (en combustion seule), soit ~644 MtCO<sub>2</sub> hors amont, en les divisant par 2 elles devraient être de l'ordre de 322 MtCO<sub>2</sub> en 2050. Or, si nous partons de 905 MtCO<sub>2</sub> (en combustion pure, hors amont) en 2018 (cf. §5.7.1) et que nous réduisons de 3,39% (cf. §4.2.3), nous arrivons en 2050 à ~300 MtCO<sub>2</sub>. La cible ATAG est donc au-dessus de cet objectif.

- De plus, les objectifs ne sont pas formulés en « budget carbone », ce qui est pourtant l'indicateur déterminant concernant l'impact du CO<sub>2</sub> sur le climat. Il est donc très difficile en l'état d'affirmer ou d'infirmer une compatibilité avec un objectif climatique tel que formulé par le GIEC. En tout état de cause, la courbe est manifestement « au-dessus » d'une courbe qui décroîtrait de 3,39% par an tous les ans, les émissions cumulées totales (l'« intégrale de la courbe ») seraient donc au-dessus du budget si elles étaient calculées.

Pourtant l'ATAG réaffirme en septembre 2020<sup>166</sup> que cet objectif est conforme à l'Accord de Paris, et même le dépasse. L'ATAG justifie cette affirmation en se référant à la cible à horizon 2050 des scénarii 2DS (« 2 Degrees Scenario ») et B2DS « Beyond 2 Degrees Scenario ») formulée par l'AIE dans le rapport ETP 2017<sup>167</sup>. Ce raisonnement pose 2 problèmes :

- Les scénarii 2DS et B2DS ont été proposés par l'AIE en 2017. Ils proposent une stratégie globale visant à li-

miter le réchauffement climatique respectivement à « +2°C » et « +1,75°C », avec une probabilité de 50%. S'ils pouvaient être jugés à l'époque comme « conformes à l'accord de Paris », ce n'est plus le cas aujourd'hui. L'AIE a d'ailleurs proposé depuis un nouveau scénario, le SDS « Sustainable Development Scenario », qui vise à limiter le réchauffement climatique à « +1,8°C » avec une probabilité de 66%, qui lui-même est jugé par l'AIE « conforme à l'Accord de Paris ». Les scénarios 2DS et B2DS ne devraient donc plus être considérés comme des références à ce jour.

- Si le rapport de l'AIE parle de cible d'émissions à atteindre en 2050, il parle aussi et surtout du chemin pour y arriver, et des émissions cumulées associés à ce chemin en regard d'un budget carbone. Or le document de l'ATAG n'évalue pas les émissions cumulées sur une période associée à la trajectoire proposée en regard d'un budget alloué sur cette même période, ce qui ne permet pas de conclure sur la contribution carbone de l'aérien.

**Ainsi, même si ces objectifs sont remarquables tant par leur existence sectorielle et internationale que par leur ambition, ils ne s'inscrivent pas dans les projections climatiques telles que formulées par le GIEC en budget carbone. À ce stade, nous ne pouvons donc pas définir un cadre physique/climatique robuste au sein duquel réfléchir aux possibilités globales d'évolution du transport aérien, sous l'angle technologique comme des usages, des perspectives de trafic et d'emplois du secteur.**

### 5.9.2 Approche retenue pour la comptabilisation des émissions<sup>168</sup>

**Sur la base du constat du §5.9.1, nous nous proposons de reconstruire des scénarios cibles et tendanciels sur lesquels nous appliquerons :**

- Les niveaux d'amélioration prévus par le secteur (scénario « Secteur ») ;
- Les améliorations apportées par les mesures que nous proposons.

Le transport aérien trouve intrinsèquement sa place, son usage et donc son marché dans un contexte international. Si, aujourd'hui, le pouvoir public légitime se trouve en grande partie à l'échelle des pays (ou d'unions économiques de pays), les grands aviateurs et motoristes sont eux naturellement positionnés sur le marché mondial. Ainsi, pour le cas de l'Europe et de la France en particulier, qui dispose d'une part importante de l'industrie aéronautique mondiale sur son territoire, la question de la décarbonation, du développement de l'innovation, du futur du trafic aérien, de la croissance économique du secteur et de ses impacts sociaux se pose à l'échelle internationale. En outre, la majorité des clients d'Airbus ne sont pas français et jusqu'à présent, les perspectives de croissance se situent davantage en Asie, en Afrique, au Moyen-

<sup>164</sup> [https://www.icao.int/Meetings/a40/Documents/WP/wp\\_054\\_fr.pdf](https://www.icao.int/Meetings/a40/Documents/WP/wp_054_fr.pdf)

<sup>165</sup> Rapport Waypoint 2050 de l'ATAG, p27 (<https://aviationbenefits.org/environmental-efficiency/climate-action/waypoint-2050/>)

<sup>166</sup> Way Point 2050, [https://aviationbenefits.org/media/167116/w2050\\_full.pdf](https://aviationbenefits.org/media/167116/w2050_full.pdf)

<sup>167</sup> Energy Technology Perspectives 2017 <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2017>

<sup>168</sup> Voir Note de calcul pour le détail des calculs effectués dans ce paragraphe

Orient ou même aux États-Unis qu'en Europe. L'étude du périmètre monde est donc pour cela essentielle (cf. 8). Néanmoins, la problématique à l'échelle locale présente des spécificités territoriales, énergétiques et organisationnelles qui, si elles sont prises en compte, permettent d'être plus précis et plus pertinent sur la proposition de solutions décarbonation. À condition de veiller à l'équilibre concurrentiel dans leur formulation et leur application, des mesures doivent pouvoir être prises à l'échelle nationale, au niveau des acteurs industriels, des opérateurs ou du législateur. Ainsi, l'étude du périmètre France (cf. 7) permet d'éclairer les politiques nationales et d'évaluer les impacts sur les emplois nationaux du transport aérien (compagnies, aéroports...). Dans tous les cas, agir sur les 2 niveaux, national et international n'est pas incompatible et reste essentiel pour atteindre l'objectif global.

En dépit des dernières avancées sur les effets « hors CO<sub>2</sub> » décrits en 5.7.2 il apparaît qu'il demeure beaucoup d'incertitudes sur la quantification de ces effets. **Le choix a été fait de se concentrer dans ce rapport sur les émissions liées uniquement à la combustion du kérosène et à la partie amont, sans y ajouter l'équivalent CO<sub>2</sub> des effets hors CO<sub>2</sub>** (tels que définis dans le chapitre 1.1.3). Comme indiqué au chapitre 5.7.2, estimer un équivalent CO<sub>2</sub> de ces effets en multipliant par 0,7 les émissions de CO<sub>2</sub> seules liées à la combustion (méthode de Lee *et al.*) n'est pas représentatif de l'impact climatique immédiat de ces effets (sous-estimation) ni de leur impact climatique à long terme (surestimation). **L'absence de prise en compte des effets hors CO<sub>2</sub> ne doit cependant pas occulter leur contribution importante au changement climatique immédiat** induit par l'aviation, en dépit des incertitudes portant sur leur quantification. Il est donc fondamental d'appliquer les principes identifiés dans le chapitre 5.7.4 en s'assurant que toute mesure décarbonante mise en œuvre par le secteur de l'aviation entraîne une réduction de ces effets hors CO<sub>2</sub> ou évite de les faire augmenter, en s'appuyant sur les connaissances les plus à jour possibles.

La première étape est de définir précisément les références, les métriques et le périmètre d'étude.

**Le périmètre d'étude correspond à l'activité de l'aviation commerciale, en France ou au niveau mondial (vols passagers, cargo ou postaux).** Pour le périmètre France, il intègre les vols intérieurs (incluant les vols métropole - outre-mer, outre-mer - outre-mer) et les vols internationaux au départ ou destination du territoire français.

Les émissions liées à la construction et à la maintenance des infrastructures, au fonctionnement des entreprises du secteur et au cycle de vie complet des avions (de la construction au recyclage) ne sont pas prises en compte. Ces émissions relèvent en effet des périmètres<sup>169</sup> associés aux bâtiments et à l'industrie, non du périmètre des transports, objet de ce rapport. S'il est nécessaire de les prendre en compte dans le cadre d'un bilan carbone complet visant à évaluer un projet d'extension ou de construction d'aéroport en comparaison d'autres options, nous considérons ici que le transport fonc-

tionne à « iso-infrastructure », c'est-à-dire qu'il utilise les capacités fournies par les infrastructures existantes. Enfin, les émissions liées à la construction et au recyclage des avions restent marginales par rapport aux émissions de transport<sup>170</sup>, c'est d'ailleurs la raison pour laquelle il est pertinent, dans un objectif de décarbonation, d'encourager le renouvellement des flottes avec les appareils de dernière génération, moins émissifs.

**Les valeurs d'émissions sont évaluées en quantité de CO<sub>2</sub> seul** (excluant ainsi tout autre effet contribuant au forçage radiatif). Les facteurs d'émission du kérosène utilisés sont issus de la BaseCarbone® ADEME<sup>9</sup> (kérosène Jet A1 ou A) : ils permettent de calculer les émissions de la partie amont (pour rappel, extraction, raffinage et transport du kérosène jusqu'au réservoir de l'avion) sur la base des émissions en vol.

**Pour le périmètre monde, les émissions 2018 sont évaluées à 1,07 GtCO<sub>2</sub>** en CO<sub>2</sub> seul et en incluant la phase amont (cf. 5.7.1)

**Pour le périmètre France, les chiffres des émissions (hors partie amont) du transport aérien commercial France sont issus des chiffres établis pour l'année 2018 par la Direction Générale de l'Aviation Civile (DGAC)<sup>171</sup>, que nous réduisons aux quantités de CO<sub>2</sub> uniquement** (retrait des effets du méthane, protoxyde d'azote, etc. produits lors de la combustion, comptabilisés dans le bilan DGAC). Pour les vols internationaux, seules les émissions de CO<sub>2</sub> des phases de LTO<sup>172</sup> et dues au fonctionnement des APU<sup>173</sup> dans et autour des aéroports français, ainsi que la moitié des phases de croisière sont comptabilisés pour la France, le reste étant attribué aux émissions du pays de départ ou de destination.

**Dans le cadre de ce rapport, les émissions de la partie amont sont prises en compte et additionnées aux chiffres fournis par la DGAC.** Cela est nécessaire pour évaluer le potentiel de réduction d'émissions de CO<sub>2</sub> lié aux carburants alternatifs - biocarburants, power-to-liquids (PTL), hydrogène. Ces carburants alternatifs, parmi les principaux leviers de décarbonation avancés par les acteurs du secteur, ont en effet un impact sur les émissions de CO<sub>2</sub> lors de leur phase de fabrication - en particulier les agrocarburants et les PTL.

Ainsi, sur le périmètre DGAC et en incluant les phases amont de production et de transport du kérosène et en excluant tout autre GES que le CO<sub>2</sub>, les émissions en 2018 sont évaluées à **26,8 MtCO<sub>2</sub>**. Ce chiffre sera pris en référence pour construire les budgets carbone, les trajectoires tendanciennes et pour évaluer l'efficacité des mesures de décarbonations proposées dans le rapport.

170 Environ 0,5% maximum d'après une interprétation des données de la figure 10 page 12 du rapport : [https://www.fzt.haw-hamburg.de/pers/Scholz/Airport2030/Airport2030\\_PUB\\_DLRK\\_13-09-10.pdf](https://www.fzt.haw-hamburg.de/pers/Scholz/Airport2030/Airport2030_PUB_DLRK_13-09-10.pdf)

171 Ministère de la Transition Écologique, Les émissions Gazeuses Liées au Trafic Aérien en France en 2018

172 Landing & Take Off: Inclut les phases de descente, atterrissage, roulage, décollage et montée mais pas la croisière.

173 Auxiliary Power Unit : moteur auxiliaire utilisé au sol pour la climatisation et autres besoins de puissance

169 Selon les grandes catégories identifiées par le Haut Conseil pour le Climat, visibles par exemple dans la version grand public du rapport 2020 [Redresser le Cap, Relancer la Transition](#)

### 5.9.3 Budget carbone monde et France pour le transport aérien<sup>174</sup>

**La contribution d'un secteur au réchauffement climatique s'évalue à partir de sa contribution au forçage radiatif. Fixer un budget carbone global permet d'anticiper, avec une certaine marge d'incertitude, une trajectoire d'évolution dans le temps du forçage radiatif lié aux émissions de CO<sub>2</sub>** (ou CO<sub>2</sub> équivalent si cela est possible). Comme vu au §4.2.3, les Accords de Paris n'ont pas permis de définir de budget carbone, ni par pays, ni par secteur d'activité. Néanmoins, de même que la négociation a permis de définir des niveaux d'efforts différents selon les spécificités de chaque pays (niveau d'émissions, de PIB...), il serait tout à fait possible, et même souhaitable, qu'un arbitrage inter secteurs d'activité portant sur les budgets carbone ait lieu. Cet arbitrage pourrait tenir compte de la difficulté technique à décarboner, du niveau de dépendance aux énergies fossiles, de la contribution actuelle aux émissions, du niveau de criticité du secteur dans l'avenir, du nombre de personnes concernées par ce secteur, etc. Malheureusement, si un tel arbitrage existe au niveau national en France via la SNBC, il n'existe pas au niveau international. Comme la SNBC exclut les émissions du transport international de son périmètre alors que les vols internationaux représentent 80% des émissions en 2018 selon la DGAC, nous ne pouvons pas nous appuyer sur le budget carbone de référence qu'elle fixe. Cette exclusion montre d'ailleurs que la problématique climatique telle que présentée par le GIEC n'est pas encore appréhendée globalement par les pouvoirs publics ni par l'industrie (pas uniquement dans le secteur aérien).

L'AIE propose cette approche sectorielle dans ses scénarios, notamment dans le scénario SDS mis à jour dans l'ETP 2020<sup>175</sup>. L'effort principal de réduction des émissions est porté par le transport routier (transport de passagers et marchandises, voitures et camions) avec une dépendance 0 aux énergies fossiles en 2070 pour le transport passager, 2050 pour les trains et 2040 pour les 2&3 roues. Pour l'aviation, le scénario propose une réduction constante mais plus faible, arrivant en 2070 autour de 0,3 GtCO<sub>2</sub>, soit un niveau effectivement supérieur à la cible formulée par l'ATAG, mais réduisant à la cible les émissions de 85% par rapport au scénario de référence STEPS (« Stated Policies Scenario », c'est-à-dire le scénario tenant compte des mesures déjà engagées à date). Cette réduction est atteinte essentiellement par des mesures technologiques, énergétiques et d'utilisation de carburants alternatifs, ainsi que par une réduction de trafic de 10 à 12% par rapport au scénario STEPS, bâti sur une hypothèse de fort taux de croissance du trafic aérien post crise COVID allant jusqu'à 6% par an en Afrique. À noter que le SDS n'intègre pas de mesure de compensation dans le calcul des émissions. Il est donc difficile de comparer le SDS avec les trajectoires avancées par le secteur qui n'intègrent pas de baisse de la croissance du trafic et comptabilisent la compensation CORSIA. Les critères de répartition des efforts de l'AIE dépendent d'une ap-

préciation du niveau de dépendance aux énergies fossiles et de la difficulté de décarbonation, estimée significativement supérieure pour l'aviation et le transport maritime que pour les autres moyens de transport. Ces critères de répartition des efforts sont des critères techniques qui permettent de tracer une trajectoire énergétique compatible avec un enjeu climatique. Ils n'intègrent pas de considération d'usage, de transformation sociétale, d'acceptabilité sociale ni de choix politiques. Si le scénario SDS de l'AIE est bien compatible avec le scénario RCP 2.6 du GIEC dans sa globalité et présente l'avantage de proposer une répartition sectorielle des efforts, les conséquences pour les populations d'une telle répartition méritent d'être discutées et la répartition finale devrait être légitimée par une instance de gouvernance démocratique.

**Ainsi, afin de définir un budget et une trajectoire de référence pour le transport aérien international et français, nous prenons les trois hypothèses suivantes :**

1. Comme vu au §4.2.3, le budget carbone global défini par le GIEC, disponible entre 2018 et 2100, permettant de contenir l'augmentation de température en dessous de +2°C par rapport à l'ère préindustrielle avec 67% de chance, et moins de 20% de chance pour +1,5°C, est le budget que nous considérons comme maximum pour respecter les accords de Paris. Il est compatible avec le scénario RCP 2.6 du GIEC. C'est donc celui-ci que nous adoptons en référence, soit 1 170 GtCO<sub>2</sub> disponibles au niveau monde entre 2018 et 2100 ;
2. Comme vu au §5.7.1, en incluant l'amont, les émissions de CO<sub>2</sub> (uniquement) du secteur aérien mondial représentaient 1,077 GtCO<sub>2</sub>, soit 2,56% des émissions monde en 2018. Nous attribuons donc 2,56% du budget carbone disponible à partir de 2018 au transport aérien mondial, soit ~29,9 GtCO<sub>2</sub>. Sans se positionner sur un arbitrage en faveur ou en défaveur du transport aérien, cette méthode permet d'intégrer une partie de la réalité de l'utilisation et de la performance technologique du transport aérien par rapport aux autres secteurs ;
3. Comme vu au §5.9.2, les émissions sur le périmètre France étudié représentaient 26,8 MtCO<sub>2</sub> en 2018, soit 2,48% des émissions monde. Nous attribuons donc 2,48% du budget carbone aérien monde au transport aérien France, soit ~744 MtCO<sub>2</sub> disponibles entre 2018 et 2100.

Ce budget de 744 MtCO<sub>2</sub> correspond bien aux émissions cumulées totales d'une trajectoire de réduction de 3,39% par an entre 2018 et 2100. Ce qui signifie que, dans cette hypothèse, le transport aérien effectue un effort de réduction similaire à la moyenne de ce scénario en intégrant en point de départ la réalité de sa part d'émission en 2018 (qui a progressé durant les 10 dernières années, étant donné que la croissance du trafic aérien a été supérieure à la croissance de l'activité globale).

**Dans ce rapport, nous regardons les trajectoires à horizon 2050.** Si ce budget était à la fois tenu et entière-

<sup>174</sup> Voir Note de calcul pour le détail des calculs effectués dans ce paragraphe

<sup>175</sup> Energy Technology Perspectives 2020 - <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2020>

ment consommé en 2050, cela voudrait dire que, à partir de 2051, les émissions devraient être nulles et que le niveau de réduction annuel moyen devrait être supérieur à 3,39% avant 2050. Ces 2 hypothèses présentant un réalisme faible, et donc un risque important, nous attribuons pour cette période un budget correspondant à une trajectoire de réduction de 3,39% par an, de 2018 à 2050 (et non à horizon 2100), soit **536 MtCO<sub>2</sub>**. Il reste donc 207 MtCO<sub>2</sub> disponible entre 2051 et 2100, soit 28% du budget total devant permettre d'atteindre la neutralité carbone d'ici 2100.

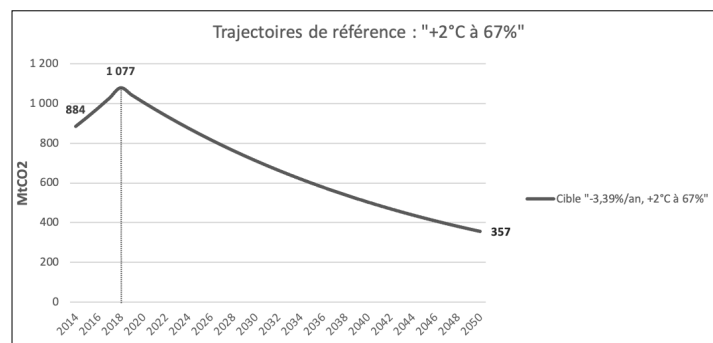
Dans le tableau récapitulatif ci-dessous, nous évaluons les budgets correspondant aux scénarios 84%, 67%, 50% et 33% décrit au §4.2.3 afin de se doter d'autres références de qualification des trajectoires ultérieures.

Nous rappelons que dans ces budgets :

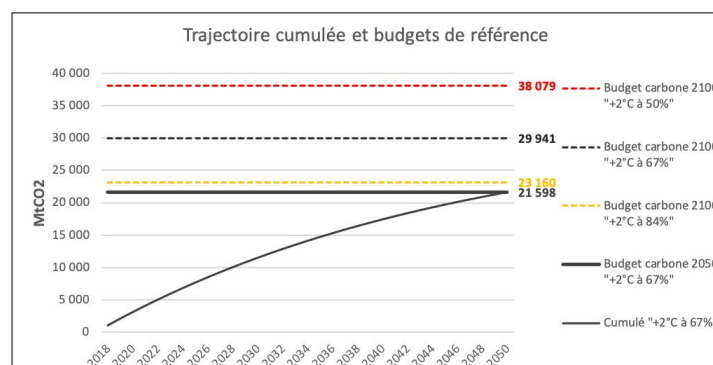
- L'effort de réduction de l'aérien est identique à l'effort moyen nécessaire pour atteindre l'objectif climatique. Il appartient à la puissance publique, ou à une gouvernance internationale, de réaliser des arbitrages inter-secteurs susceptibles de revoir à la hausse ou à la baisse ces budgets en fonction de priorités économiques et sociétales et des contraintes de décarbonation propres aux différents secteurs.
- Dans le périmètre de ce budget carbone France, sont comptés également les « demi-voyages » des étrangers à destination de la France. La France étant une des premières destinations touristiques au monde, et les vols touristiques étant bien supérieurs en nombre aux vols business, la contribution des demi-vols pour les séjours à destination de la France est significative dans ce budget.

**Tableau 4 - Budgets CO<sub>2</sub> Globaux et aérien à partir de 2018 selon les objectifs climatiques (ci-dessous)**

| Objectif climat                                       | Budget CO <sub>2</sub> disponible entre 2018 et 2050 (MtCO <sub>2</sub> ) |                             |                                           | Budget CO <sub>2</sub> total disponible à partir 2018 (MtCO <sub>2</sub> ) | Taux de réduction annuel correspondant |
|-------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|
|                                                       | Monde                                                                     | Aérien mondial (avec amont) | Aérien France (périmètre DGAC avec amont) | Aérien France (périmètre DGAC avec amont)                                  |                                        |
| <b>Rester sous « +2°C » à 84%, compatible RCP 2.6</b> | 726 264                                                                   | 18 586                      | 462                                       | 575                                                                        | 4,55%                                  |
| <b>Rester sous « +2°C » à 67%</b>                     | 843 954                                                                   | 21 598                      | 536                                       | 744                                                                        | 3,39%                                  |
| <b>Rester sous « +2°C » à 50%</b>                     | 944 374                                                                   | 24 167                      | 600                                       | 946                                                                        | 2,57%                                  |
| <b>Rester sous « +2°C » à 33%</b>                     | 1 100 572                                                                 | 28 165                      | 699                                       | 1272                                                                       | 1,51%                                  |



**Figure 24 - Trajectoire de référence - Monde**



**Figure 25 - Trajectoire cumulée et budgets carbonés de référence - Monde**

### 5.9.4 Établissement d'une trajectoire tendancielle de référence Monde<sup>176</sup>

L'hypothèse de travail concernant la croissance du trafic aérien hors crise COVID est celle formulée le plus régulièrement par le secteur : 4%/an<sup>177</sup>. Ce taux peut être considéré comme élevé, mais il reste inférieur au taux de croissance France, par exemple, de 4,54% entre 2015 et 2019<sup>178</sup>. Cette hypothèse est structurante sur l'atteinte ou non des objectifs de décarbonation de l'aviation. Néanmoins, l'objet de cette étude est de

<sup>176</sup> Voir le détail des hypothèses, estimations et références utilisées dans ce paragraphe dans la note de calcul

<sup>177</sup> Dans sa projection 2019-2039, IATA prévoit une croissance mondiale entre 3,2% et 5,3% par an. <https://www.iata.org/contentassets/e938e150c-0f547449c1093239597cc18/pax-forecast-infographic-2020-final.pdf>

<sup>178</sup> 352,3 Mrd PKT en 2015 contre 420,8 Mrd PKT en 2019 selon les indicateurs tendanciels de la DGAC : <https://www.ecologie.gouv.fr/statistiques-du-traffic-aerien>

regarder les conditions pour rester dans un budget carbone donné et de, in fine, ajuster cette hypothèse. En cela la valeur prise en référence ici n'est pas structurante dans le raisonnement et a vocation à être ajustée si nécessaire.

Les impacts de la crise COVID ont été évalués sur la base de prévisions IATA et Eurocontrol, avec une hypothèse de retour au niveau de trafic de 2019 en 2024. L'hypothèse de reprise du trafic sera également ajustée afin d'évaluer sa sensibilité, il s'agit ici d'avoir une première forme plausible de trajectoire.

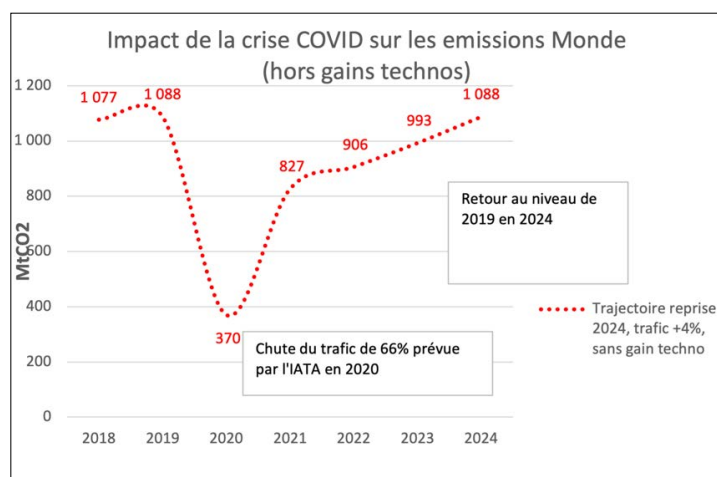


Figure 26 - Prévisions de l'impact de la crise COVID sur les émissions Monde hors amélioration continue de performance énergétique (voir détail dans la note de calcul)

Ainsi, nous obtenons une trajectoire de référence des émissions suivant directement le trafic (sans aucune forme d'amélioration de performance) et considérant une reprise en 2024.

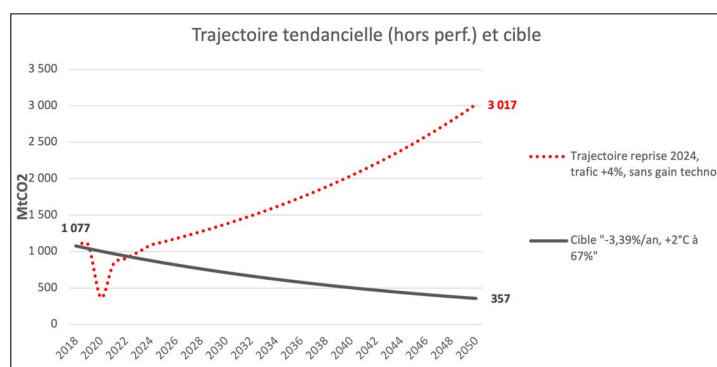


Figure 27 - Trajectoires tendancielle et cible - Monde

En intégrant les effets de la crise COVID, le taux de croissance moyen est de 3,5%.

## 5.9.5 Les trajectoires « Secteur »

Ici, nous regardons et réintégrons dans le modèle l'impact des améliorations prévues par le secteur à horizon 2050 sur le tendanciel. Nous les appelons « Secteur ». Ces améliorations sont de 2 natures différentes : les améliorations de performance (avion et opérations) et l'utilisation de carburants alternatifs.

### 5.9.5.1 Les prévisions d'améliorations de performance

Nous choisissons, pour la trajectoire « Secteur » de retenir l'hypothèse d'amélioration de performance de 2% par an à partir de 2018, soit l'hypothèse la plus optimiste avancée à ce jour par le secteur.

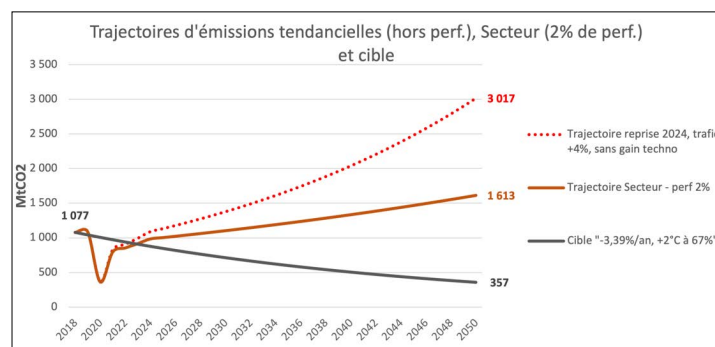


Figure 28 - Trajectoire « Secteur » avec 2% d'amélioration de performance annuelle

La trajectoire « Secteur – perf 2% » de la Figure 28 montre ainsi l'impact de l'amélioration de performances sur la trajectoire d'émissions.

### 5.9.5.2 La montée en puissance des carburants alternatifs

L'OACI fait l'hypothèse que, à horizon 2050, la flotte mondiale volera avec les réservoirs remplis à 100% de carburants alternatifs. Même si une telle hypothèse semble extrêmement optimiste, notamment au regard des externalités de production d'une telle quantité de carburant, l'objet ici n'est pas de remettre en cause cette hypothèse, mais de s'y conformer pour en regarder l'impact sur les trajectoires d'émissions et les budgets carbone. Les dernières générations d'avion en vol (A3XX NEO, B737 Max, B787, A350) sont certifiées pour un taux d'incorporation de carburants alternatifs de 50% (c'est-à-dire qu'ils peuvent embarquer au maximum 50% de carburant alternatifs). Néanmoins, actuellement, ils n'en utilisent que très peu faute de disponibilité de carburant. Pour atteindre 100%, il faut donc prévoir une évolution des moteurs et un nouveau processus de certification. Nous prenons l'hypothèse que cette évolution arrive en 2035. Les carburants alternatifs envisagés sont de 3 types (Bio-carburants, PTL, Hydrogène) (voir détail au §7.2.2.3).

### Nous prenons ainsi les hypothèses suivantes :

- Le carburant alternatif est composé de 50% de bio-carburant 2<sup>ème</sup> génération (à base de déchets forestiers et agricoles) et 50% de PTL produit par captation de CO<sub>2</sub> (à 50% dans l'air et à 50% en sortie d'usine) et hydrogène par électrolyse avec de l'électricité éolienne<sup>179</sup> ;
- La production de SAF arrive à 6Mt en 2025 (voir estimation McKinsey et OACI au §8.1) et atteint 100% en 2050 en progression géométrique, ce qui donne une trajectoire de la production au-dessus des prévisions actuelles ;

179 Voir le détail des hypothèses et références utilisées pour le calcul des émissions dans la note de calcul

• En dépit des récentes annonces (notamment d'Airbus), la technologie Hydrogène à horizon 2050 reste regardée avec précaution par le secteur. La trajectoire de l'OACI parue en 2019 (Figure 23) n'intègre pas, par exemple, de rupture technologique de type « Avion à Hydrogène ». Le rapport WayPoint 2050 (paru en 2020) de l'ATAG indique par exemple « *By 2050, it is expected that electric- and hydrogen-powered propulsion have the potential to serve regional, short-haul and perhaps medium-haul markets* »<sup>180</sup>. À ce stade, nous nous alignons, pour la trajectoire « Secteur » sur une hypothèse sans hydrogène, ou plutôt sans « avion à hydrogène en nombre suffisant » pour infléchir significativement la courbe d'émission. Nous regarderons les impacts de la technologie hydrogène dans des hypothèses plus volontaires dans la suite du rapport. À noter que l'hypothèse « 50% PTL » mentionnée ci-dessus pourrait être transformée en « 25% PTL et 25% hydrogène » sans impact majeur sur les trajectoires d'émissions.

Ce qui nous conduit à la trajectoire suivante :

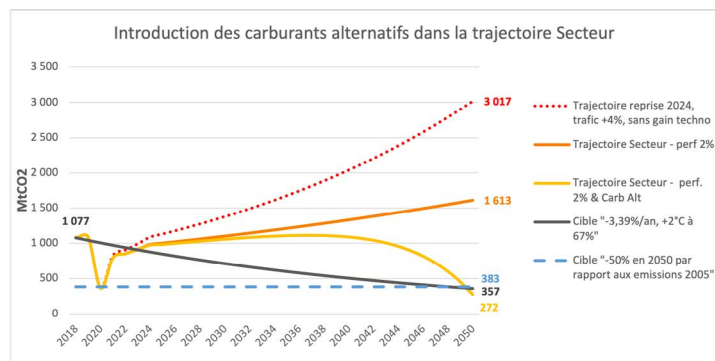


Figure 29 - Effet de l'introduction progressive des carburants alternatif (50% bio carburant, 50% PTL) pour arriver à 100% en 2050

Cette trajectoire est meilleure que celles projetées par le secteur aérien (en incluant l'amont)<sup>181</sup>. En particulier, sous des hypothèses particulièrement favorables (dont les externalités énergétiques ne sont pas étudiées ici), nous reconstituons une trajectoire qui arrive in fine en dessous de la cible de l'ATAG (« Réduire de moitié les émissions en 2050 par rapport au niveau de 2005 ») et même en-dessous de la cible de notre trajectoire de référence.

Cependant, l'impact carbone de cette trajectoire ne dépend pas de la cible atteinte en 2050, mais de la somme cumulée des émissions rejetées dans l'atmosphère entre 2018 et 2050 à comparer avec le budget carbone de référence.

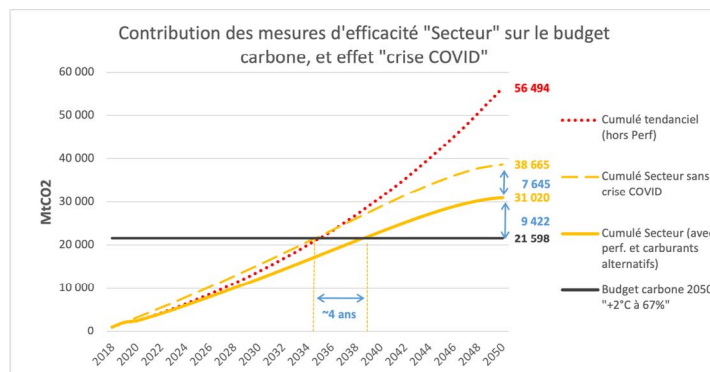


Figure 30 - Émissions cumulées Secteur avec toutes les mesures d'efficacité comparées au budget carbone et effet de la crise COVID

Dans cette perspective, nous voyons que le budget carbone est atteint autour de 2039 et qu'il est nécessaire de réduire les émissions d'environ 9,5 GtCO<sub>2</sub> pour être dans le budget, soit un effort supplémentaire d'environ 30% des émissions cumulées totales (cf. Figure 30).

En comparant cette courbe avec une courbe « hors crise COVID » intégrant par ailleurs les mêmes hypothèses, nous pouvons constater que la crise retarde d'environ 4 ans l'année de l'atteinte du budget et représente une contribution d'environ 45% de l'effort de réduction qu'il aurait fallu réaliser pour rester dans le budget.

Ces estimations sont à apprécier avec la plus grande prudence au vu des nombreuses hypothèses prédictives émises par le secteur lui-même. Néanmoins, elles permettent de situer le problème et l'ampleur de l'effort dans son ordre de grandeur.

### 5.9.5.3 Incidence de CORSIA et trajectoires Secteur finales

Comme détaillé au §5.6.2, la capacité de CORSIA à assurer la croissance neutre en carbone de l'aviation internationale à partir de 2021 repose sur la couverture des routes aériennes soumises à la compensation, et donc sur la participation des états au programme. En effet, le principe du régime est de compenser chaque année, à partir de 2021, la quantité d'émissions excédant le niveau moyen 2019-2020 (finalement ramené au niveau 2019 suite à la crise COVID-19) sur les routes concernées (i.e. celles entre états participants). Plus le nombre d'états participants est important, plus le réseau de routes est étendu, plus la couverture par CORSIA des émissions de CO<sub>2</sub> de l'aviation internationale est élevée.

Dans l'hypothèse où tous les états responsables d'activités aériennes internationales participaient au programme, la totalité des émissions de CO<sub>2</sub> seraient couvertes. Il serait alors en théorie possible, sous réserve que toutes les compagnies visées par le régime respectent les exigences de compensation d'assurer une croissance dite « neutre en carbone » au sens de la compensation.

Toutefois, en raison des règles adoptées par l'OACI, des états participants s'engageront sur la globalité de la période 2021-2035<sup>182</sup>. Les routes non couvertes ne seront en conséquence

<sup>180</sup> [https://aviationbenefits.org/media/167116/w2050\\_full.pdf](https://aviationbenefits.org/media/167116/w2050_full.pdf)

<sup>181</sup> Voir Note de calcul : 650 MtCO<sub>2</sub>eq hors amont donne 766 MtCO<sub>2</sub> avec amont en 2005, soit une cible à 383 MtCO<sub>2</sub> en 2050

<sup>182</sup> La participation se fait en effet sur base de volontariat uniquement sur la période 2021-2026. À compter de 2027 la participation est facultative pour les États d'activités aériennes réduites ou moins développées ou insulaires en développement.

soumises à aucune compensation et leur croissance ne sera pas limitée. Une étude de CE Delft<sup>183</sup> de 2016 a en effet révélé que seules 76% des émissions totales de CO<sub>2</sub> de l'activité aérienne internationale sur la période 2021-2035 seraient couvertes par CORSIA, les 24% restants étant les émissions produites sur la même période sur les routes internationales non couvertes par le régime. Toujours selon la même étude seules 28% des émissions couvertes par le régime seraient compensées par les compagnies aériennes sur la période 2021-2035.

### **CORSIA compenserait ainsi environ 20% des émissions de l'aviation internationale sur la période 2021-2035.**

Afin d'évaluer l'effet maximum du programme CORSIA sur le tendanciel, nous avons considéré un programme fictif **CORSIA\*** dans lequel 100% des émissions, y compris les émissions domestiques qui sont hors du périmètre CORSIA, dépassant le niveau de 2019, étaient compensées dès 2021 et que la compensation était bien équivalente à une réduction totale et immédiate des émissions. **Il est important de noter que ces 2 hypothèses maximisent très largement l'effet réel de CORSIA sur la réduction des émissions.**

Nous obtenons alors les résultats suivants :

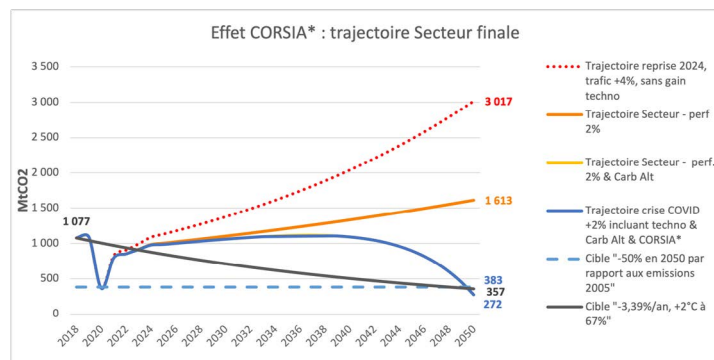


Figure 31 - Effet du programme CORSIA\* sur les trajectoires d'émission Secteur

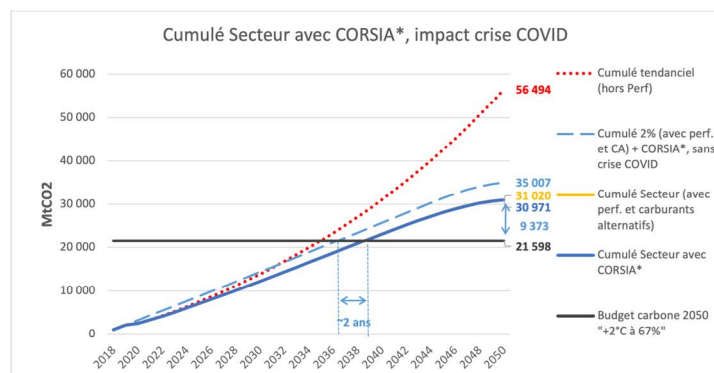


Figure 32 - Émissions cumulées Secteur avec CORSIA\*, effet COVID et budget carbone

- Du fait des effets de la crise COVID couplés aux hypothèses d'amélioration annuelle de performance et de montée en puissance des carburants alternatifs, la compensation CORSIA\* n'est effective qu'entre 2034 et 2038, et son impact de réduction reste marginal : ~50 MtCO<sub>2</sub>, soit ~0,16% des émissions cumulées réelles en 2050.

- Du fait que la compensation CORSIA ne concerne que les émissions de combustion (elle ne concerne pas les phases amont), une légère croissance des émissions perdure après 2034.

- La date d'atteinte du budget carbone reste quasi inchangée (2039) et l'effort restant à faire serait toujours d'environ 9 GtCO<sub>2</sub>, soit environ une réduction de ~30% des émissions totales.

- L'impact de la crise COVID sur les émissions est moins important du fait de CORSIA. En effet, si le trafic avait progressé après 2019, les émissions à court terme auraient augmentées significativement au-delà du niveau de 2019 et CORSIA aurait alors permis de compenser un plus gros volume d'émissions qu'il ne peut le faire dans le contexte actuel. Pour les compagnies aériennes, le coût de compensation CORSIA est mécaniquement supprimé pendant la crise, ce qui est un moindre mal au vu des difficultés économiques engendrées par la baisse brutale de trafic.

**Ainsi, le programme fictif CORSIA\*, c'est-à-dire CORSIA appliqué dans des hypothèses très optimistes, ne permet pas de rapprocher le transport aérien d'une trajectoire « 2°C », et ce car son ambition est de stabiliser les niveaux d'émission par compensation, et non de les réduire.** De plus, si le transport aérien parvenait à stabiliser ses émissions à un niveau légèrement inférieur à 2019 (par exemple le niveau de 2018), le programme CORSIA n'aurait aucun effet, en tout cas dans sa définition actuelle, et pour autant, les budgets carbone « 2°C » seraient là aussi largement dépassés. Enfin, CORSIA ne compense que les émissions de CO<sub>2</sub> (les seules que nous considérons dans la présente étude) mais fait complètement l'impasse sur les effets hors CO<sub>2</sub> qui augmentent si le trafic croît, sans être compensées.

Cela dit, de par son mode fonctionnement et de par les incertitudes existantes autour de ces projections, il constitue une incitation concrète à la réduction des émissions pour les compagnies aériennes, à condition que le prix du carbone soit aligné avec le prix du marché, donc à aller au plus vite vers les solutions de limitation des émissions, et présente le double avantage d'exister à un niveau international et d'être piloté par un organisme reconnu par le secteur aérien : l'OACI. Ces 2 éléments permettent de le rendre plus rapidement acceptable par les professionnels du transport aérien. Il ne s'agit donc pas ici de s'opposer à CORSIA mais bien d'avoir conscience concrètement de ses effets et de sa portée.

D'un point de vue méthodologique, il convient d'appliquer la compensation CORSIA sur une trajectoire déjà optimisée techniquement du point de vue des émissions afin d'évaluer le niveau de compensation sur 2018-2050 donc l'impact prévisionnel de CORSIA sur cette période. C'est ce que nous ferons dans la suite du rapport, mais, comme vu plus haut, nous savons déjà que soit nous parvenons à réduire suffisamment les émissions et CORSIA sera inactif, soit nous n'y parvenons pas et CORSIA ne nous permettra pas de rester dans le budget.

## 5.10 Le plan de relance du gouvernement présenté en juin 2020

En réaction à la crise du COVID-19 et à ses conséquences désastreuses sur l'aéronautique, le gouvernement français a présenté en juin 2020 un plan de plus de 15 milliards d'euros d'aides, d'investissements et de prêts et garanties à destination des entreprises du secteur.

### Ce plan se décline sur 3 axes :

1. Répondre à l'urgence en soutenant les entreprises en difficulté et protéger leurs salariés ;
2. Investir dans les PME et les ETI pour accompagner la transformation de la filière ;
3. Investir pour concevoir et produire en France les appareils de demain.

Si le troisième axe nous intéresse ici au premier chef, car c'est un des leviers de décarbonation que nous étudions et chiffrons en partie 7.2.2.2 de ce rapport, les deux premiers méritent quelques mots. Le gouvernement entend protéger les salariés du secteur et accompagner la transformation de la filière, mais n'aborde pas la question de la transformation des emplois. Le plan ne précise par ailleurs pas les hypothèses qui sont faites sur la durée de la crise et sur les perspectives de croissance du trafic d'ici 2050, alors que ces éléments sont structurants dans la manière d'appréhender les trajectoires d'innovation, de maintien et de transformation de compétences.

Malgré le plan de soutien, et même si le secteur est le premier à avoir reçu de l'aide de l'État, la décision d'interrompre le trafic aérien pour freiner la propagation du virus s'est traduite par des licenciements conséquents, signe hélas de la faible résilience d'une industrie très peu diversifiée face à ce type de crise. À l'avenir, les tensions sur l'approvisionnement énergétique et les conséquences du changement climatique seront incontestablement des facteurs de risque qui augmenteront la probabilité de crises aux conséquences similaires, et auxquelles le secteur doit se préparer. Nous donnons ainsi, dans la partie 9.4, quelques pistes de diversification de l'industrie.

### Quant au troisième axe du plan de relance, nous comprenons que le gouvernement :

- Fait le pari de la rupture technologique d'ici 2030 / 2035 en visant un appareil « zéro émissions de CO<sub>2</sub> », pour le moyen/long courrier (successeur de l'A320) comme pour les vols régionaux ; le tout avec des premiers démonstrateurs entre 2026 et 2028.
- Mise fortement sur l'hydrogène et l'utilisation des biocarburants pour y parvenir.
- Demande en contrepartie des aides accordées à Air France-KLM :

- de fermer ses lignes intérieures dès lors qu'il existe une alternative train dont le temps de trajet est inférieur à 2h30 ;
- de 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 ;
- de ne pas ralentir la modernisation de la flotte moyen et long-courrier.

L'investissement dans un programme avion moyen/long courrier diminuant significativement la consommation d'énergie fossile est évidemment, dans le cadre de la nécessaire décarbonation du secteur, à encourager. Nous soutenons aussi le fait de remplacer les trajets intérieurs par le train, et les récentes prises de parole du gouvernement qui semblent confirmer la fin de l'autorisation **pour toutes compagnies** d'exploiter les liaisons abandonnées par Air France, afin d'éviter une situation de concurrence déloyale, nous semble aller dans le bon sens.

En revanche, le plan de sauvetage ne chiffre pas les trajectoires concrètes de réduction des émissions de GES qu'il permettrait, pas plus que la SNBC ne fixe d'ailleurs d'objectifs au transport aérien international. Le plan ne propose aucune action de diminution immédiate des émissions, et l'absence de chiffrage pose le problème de sa pilotabilité. Tout miser sur les ruptures technologiques futures comporte des risques technologiques et industriels, et donc des choix et des arbitrages à faire au bon moment. Comment faire ces arbitrages sans trajectoire claire ? Et par ailleurs qui les fera, sur quels critères ?

Le gouvernement indique avoir élaboré ce plan avec l'aide du GIFAS, et précise que c'est également ce dernier qui aura la charge d'en faire le suivi. Ce choix est questionnable. Si l'expertise technico-industrielle de ce dernier ne fait aucun doute, le GIFAS est aussi un groupe d'influence qui défend sa vision des intérêts de l'industrie aéronautique et du transport aérien en premier lieu. Il est ainsi probable qu'il soit naturellement peu enclin à mener une transformation de fond étant donné le caractère oligopolistique du marché qui invite les acteurs à la prudence et à la conservation. Il nous semble ainsi préférable que la mise en œuvre et le suivi du plan de soutien soient assurés en partie par la puissance publique, appuyée par des organismes pluriels intégrant, outre les représentants du secteur, des scientifiques du climat et des spécialistes de l'énergie.

Le plan de relance mentionne enfin l'avènement d'un appareil « zéro émission de CO<sub>2</sub> » basé sur des technologies à hydrogène. Si nous discutons également, chiffrages à l'appui, les possibilités de décarbonation offertes par le passage à ce type de carburants dans les sections 7.2.2.3 et 7.2.3 de ce rapport, il convient toutefois ici de rappeler que le « zéro CO<sub>2</sub> » n'existe pas. Quel que soit le carburant envisagé, il faut prendre en compte l'impact climatique de l'énergie grise, la disponibilité des ressources énergétiques et chimiques nécessaires à sa fabrication, instruire les éventuels arbitrages sur l'utilisation des ressources, de l'énergie et des surfaces en faveur du transport aérien ou d'un autre secteur. Cela s'applique à l'hydrogène, aux agro-carburants comme aux carburants de synthèse. Avant de dire qu'un avion puisse être « bas carbone »

(hors mécanisme de "compensation"), il faut aller bien au-delà du simple périmètre de l'aviation et bien considérer l'ensemble du cycle de vie, et c'est la raison pour laquelle nous réintégrons dans ce rapport les émissions amont (extraction du pétrole, raffinage transport du kérosène).

## 5.11 Conclusion

À ce stade de l'analyse, nous faisons donc les constats suivants :

- Eu égard aux conséquences sur les conditions de la vie sur terre, les sociétés humaines et l'économie, rester sous la barre des « +2°C », dans l'esprit des Accords de Paris, constitue un cadre physique et climatique non négociable au sein duquel nous pouvons encore agir. Il s'agit d'une priorité essentielle, de premier ordre ;

- Selon les connaissances scientifiques à date, **rester sous la barre des « +2°C » impose de réduire significativement les émissions anthropiques de GES** afin d'être compatible avec le scénario RCP 2.6 du GIEC ;

- **Cette trajectoire de réduction implique des transformations profondes et rapides** de nos modes de production, de transport, de consommation, donc de nos modes de vie. Plus nous prenons du retard, plus il faudra accélérer cette trajectoire, plus le choc de transformation sera important ;

- **Le transport aérien a contribué à hauteur de 2,56 % des émissions mondiales de CO<sub>2</sub> en 2018, et de 3,5% au forçage radiatif global mesuré en 2011 en tenant compte des meilleures estimations actuelles des effets « hors CO<sub>2</sub> » ;**

- La crise du COVID-19 a, et aura, des impacts dévastateurs sur l'industrie aéronautique et le transport aérien, notamment en termes d'emplois. **Le trafic aérien ne devrait pas retrouver son niveau de 2019 avant 2024.** Cette crise, la plus grave jamais rencontrée par le secteur, a naturellement des effets sur les émissions de GES du transport aérien ;

- Pourtant, les trajectoires de croissance du trafic aérien telles qu'envisagées par **l'IATA ou l'OACI projettent une augmentation significative de la contribution du transport aérien au réchauffement climatique ;**

- **Il n'existe pas de gouvernance internationale pour définir une trajectoire de réduction des émissions de GES du transport aérien** issue d'un arbitrage global entre secteurs d'activité garantissant la tenue globale de l'objectif ;

- Nous fixons donc, par défaut, l'effort de réduction des GES incombant au secteur aérien et le budget carbone associé, au niveau de l'effort planétaire pour rester sous les 2°C en 2100 avec une probabilité de 67%. Tout autre arbitrage, à la hausse ou à la baisse, nécessite un débat public et une décision politique ;

- Afin d'évaluer le potentiel décarbonant de solutions basées sur les carburants alternatifs, dont le caractère bas-carbone n'a de sens que sur l'intégralité du cycle de vie, **il est nécessaire de réintégrer l'amont** (recherche, extraction, raffinage et transport du kérosène) dans le calcul des émissions et le budget carbone associé ;

- **Au niveau Monde, en incluant les phases amont, le budget carbone du secteur aérien est de 21,6 GtCO<sub>2</sub> entre 2018 et 2050.** Ce budget est obtenu en conservant la part relative du transport aérien dans les émissions de la planète, en considérant que chaque pays réalise le même « effort relatif » (sans considération démographique) ;

- Depuis qu'elle existe, l'industrie aéronautique n'a eu de cesse d'améliorer l'efficacité énergétique des avions pour des raisons économiques, de performance et de démocratisation des usages. Néanmoins, ces améliorations ont jusqu'à présent essentiellement bénéficié à l'augmentation du trafic et des distances parcourues, donc des émissions de GES. Si elle assure des missions essentielles à l'équilibre mondial actuel, **l'aviation contribue aussi de manière croissante au réchauffement climatique ;**

- En prenant en compte une amélioration de performance de 2% par an, la plus optimiste avancée par le secteur aérien, une montée en puissance de l'utilisation des carburants alternatifs à 100% en 2050, ainsi que l'application maximale et immédiate du programme de compensation CORSIA de l'OACI **le budget carbone est atteint autour de 2039 et les émissions cumulées totales en 2050 dépassent le budget de 43%** (cf. Figure 33), et ce sans compter les effets « hors CO<sub>2</sub> » ;

- Cette trajectoire dépasse même le budget total (à horizon 2100) permettant de rester sous les +2°C avec une probabilité de 67% aux alentours de 2048. Ceci signifierait qu'il ne faudrait plus émettre de CO<sub>2</sub> à partir de cette date pour rester dans ce budget. Cette trajectoire arriverait sans doute plus proche du budget « +2°C avec une probabilité de 50% » en 2100 (cf. Figure 33). Si ce niveau était communément défini comme « conforme aux Accords de Paris » dans le passé, il est aujourd'hui admis que la référence est bien le scénario RCP 2.6 du GIEC à l'intérieur duquel se situe la trajectoire « -3,39%/an et 67% de chance de rester en dessous de +2°C » que nous prenons en référence.

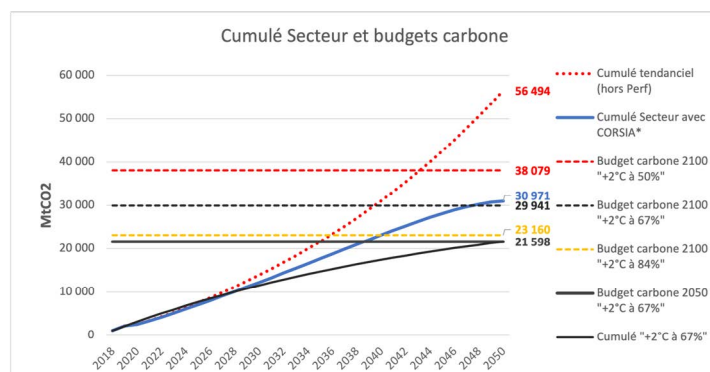


Figure 33 - Trajectoire Secteur et budgets carbone

• **Les deux axes majeurs de réduction des GES supplémentaires présentés par le secteur à date sont les suivants :**

- Miser sur des ruptures technologiques décarbonantes, en particulier l'hydrogène (cf. le plan du gouvernement) ;
- Accélérer l'usage des carburants alternatifs (biocarburants, carburants de synthèse, hydrogène), ceux-ci devant être couplés ou non à des avions en rupture technologique (comme pour l'hydrogène).

• **Ces deux propositions ne peuvent être poussées au maximum de leur potentiel sans considérer les risques suivants :**

- Il est très peu probable qu'un avion en rupture, type « avion à hydrogène » arrive avant 2035 (pour rappel, Airbus annonce la sortie d'un tel avion en 2035, sous conditions de soutien massif des Etats et de collaboration internationale poussée). Or en 2039, si rien d'autre n'est fait, le budget carbone sera dépassé. Il ne restera donc que 4 ans pour renouveler la flotte mondiale et déployer les infrastructures de production et distribution d'hydrogène à grande échelle ;
- L'usage des carburants alternatifs engendre des externalités de production de carburant (énergie nécessaire, surfaces de couverture des sols avec des éoliennes ou des panneaux solaires) : cette option, qui nécessite des arbitrages très forts en faveur du transport aérien au détriment d'autres secteurs, doit être étudiée plus globalement, en ce qu'elle impose une limite physique d'une autre nature.

• **Dans cette perspective, le transport aérien doit s'inscrire dans un débat public plus général sur l'utilisation des ressources, des surfaces et des financements.** C'est alors que, une fois le cadre physique fixé, la réflexion sur les usages et les missions prioritaires du transport aérien doit avoir lieu et doit permettre de préparer le secteur à s'adapter à la contrainte carbone, de façon socialement acceptable et proposer les services de transports qui seront jugés essentiels.

C'est sur la base de ces constats que ce rapport se propose d'évaluer, ou de réévaluer, en détail un ensemble d'axes d'améliorations techniques et opérationnelles, à court, moyen et long terme, de mesurer leurs impacts, au niveau France et au niveau Monde, d'évaluer l'effort de sobriété restant à faire afin de rester dans le budget carbone et d'anticiper le virage de sobriété sur l'emploi et l'outil industriel de l'aéronautique française.

**Les 2 périmètres, France et Monde, méritent selon nous d'être tous les deux étudiés, avec le plus de détails possibles :**

• **Le périmètre France** est sous la responsabilité de l'État Français qui a une légitimité d'action forte, selon les modalités citoyennes et démocratiques en vigueur, tout en tenant compte des risques concurrentiels internationaux, des risques économiques et sociaux. Chaque pays a des spécificités qui doivent être prises en compte

dans un objectif d'efficacité, de pertinence des alternatives éventuelles, et d'acceptabilité sociale des mesures. Nous pouvons citer par exemple : l'intensité carbone du mix électrique, l'existence, le déploiement et le potentiel d'un réseau de mobilités intérieures faiblement carboné, la surface du pays et l'existence ou non de régions Outre-Mer, l'activité touristique et la caractérisation de l'usage fait de l'aérien... Ainsi le périmètre France a été étudié en détails en tenant compte de ces paramètres et des possibilités d'action locales.

• **Le périmètre Monde** est le plus pertinent pour évaluer la contribution réelle du transport aérien, par nature inscrit dans une dimension internationale, au changement climatique. Si une action synchronisée au niveau mondial serait bien plus efficace, force est de constater que la légitimité d'action est moins importante qu'au niveau national et que le processus de prise de décision est plus long et moins efficace, la défense des intérêts locaux prenant souvent le dessus dans les négociations. L'action internationale est à mener de front avec l'action nationale. Enfin, le marché de l'industrie aéronautique est structuré à l'échelle mondiale. Dans un pays comme la France où l'industrie aéronautique occupe une place importante, tant au niveau des performances économiques nationales que de l'emploi, il est essentiel de s'intéresser aux trajectoires mondiales afin d'évaluer les impacts sur l'activité, y compris nationale, d'en tirer les conclusions et d'organiser une éventuelle transformation du secteur.

Le pilotage des émissions totales du transport aérien est un sujet qui nécessite une forte coordination nationale et internationale sans un objectif essentiel de maîtrise des trajectoires carbone.

**Proposition n°0 : Définir un budget carbone-eq et une trajectoire de réduction des GES pour le transport aérien, national et international, tenant compte de l'entière réalité de l'impact climatique du transport aérien. Le budget carbone-eq de l'aviation internationale pourrait être défini par l'OACI. Il doit s'insérer dans un budget global des émissions monde compatible avec une trajectoire 2°C (actuellement scénario RCP 2.6 du GIEC). Au niveau France, inclure ces objectifs dans le budget carbone de la SNBC et dans la prochaine révision des Contributions au Niveau National (CDN) de la France révisées périodiquement dans le cadre de l'Accord de Paris. Identifier une instance officielle chargée de piloter la baisse des émissions. Défendre un projet de complémentarité des systèmes ETS régionaux avec CORSIA auprès de la commission européenne.**

## 6 Piloter les émissions totales du transport aérien au niveau national et international

### 6.1 Définir un indicateur de mesure des émissions qui tienne compte de l'entière réalité de l'impact climatique du transport aérien

Afin de mesurer et projeter les émissions imputables à la France dans le transport aérien national et international, nous proposons dans un premier temps que celles-ci soient dans le cadre de la SNBC comptabilisées sur le périmètre utilisé par la DGAC : LTO, APU et demi-croisière pour les vols internationaux.

Nous proposons également que la DGAC intègre la mesure des effets « hors CO<sub>2</sub> » et produise ainsi un indicateur d'émissions en MtCO<sub>2</sub>eq complet, basé sur les meilleures évaluations scientifiques et dépendra des technologies de propulsion en service (turboréacteur, turbopropulseur, avion hydrogène, ...).

Enfin et surtout, nous proposons que les émissions amont des carburants (recherche, extraction, raffinage pour les carburants issus des énergies fossiles, capture de carbone et synthèse pour les autres, transport pour tous) soient comptabilisées dans cet indicateur, afin que l'effet décarbonant des carburants alternatifs soit pris en compte à sa juste valeur, sur l'ensemble du cycle de vie.

Idéalement, cet indicateur est défini au niveau international (par l'OACI par exemple), et repris par l'ensemble des pays. Mais rien n'empêche la France de le faire tout de suite, de le proposer, de l'utiliser sur son périmètre, tout en conservant les indicateurs actuellement partagés dans le cadre des Accords de Paris permettant de comparer les trajectoires de décarbonation avec les autres pays.

### 6.2 Définir un budget carbone et une trajectoire à inclure, au niveau national, dans la SNBC

**Cette mesure vise à conserver l'empreinte carbone du secteur aérien dans une enveloppe assurant une conformité avec les objectifs climatiques français et mondiaux. La première étape nécessaire est donc de définir la dite enveloppe.**

Le budget carbone du transport aérien international pourrait être défini par l'OACI, en assurant qu'il s'insère dans un budget global compatible avec une trajectoire à « +2°C ». La déclinaison par pays fera probablement l'objet d'âpres négociations, sans garantie d'aboutir, c'est la raison pour laquelle chaque pays peut/doit agir sans attendre. En l'absence d'une telle définition, la règle d'équité intersectorielle proposée en 5.9.3 s'applique.

À l'heure actuelle, la France s'est dotée d'un outil, la Stratégie nationale bas carbone (SNBC), qui n'inclut pas les émissions du transport international. Or la mesure actuelle des émissions de CO<sub>2</sub> de la DGAC étant tout de suite disponible, elle peut donc techniquement être intégrée rapidement à la SNBC. Cette proposition rejoint la recommandation n°7 du rapport 20019 Haut Conseil pour le Climat quant à la considération de la notion d'empreinte carbone au regard de l'objectif de neutralité<sup>184</sup>. Dans un deuxième temps, nous proposons d'intégrer à la SNBC une mesure MtCO<sub>2</sub>eq basée s'appuyant sur le consensus scientifique pour la comptabilisation des effets hors CO<sub>2</sub>.

La version provisoire du scénario de référence pour l'énergie et le climat<sup>185</sup> (SNBC-PPE) indique que si les transports internationaux sont pris en compte dans le bilan énergétique et décarbonés à hauteur de la moitié de leur consommation d'énergie en 2050, ils restent à date en dehors des inventaires nationaux de gaz à effet de serre. C'est d'autant plus regrettable que le principe d'imputer à la France la moitié des émissions du transport international est à la fois répliquable et vertueux : il peut être adopté par tous les autres pays sans risque de double comptabilisation des émissions, et incite à la coopération internationale dans la mise en œuvre des stratégies de décarbonation.

Si nous traitons dans ce rapport du sujet de l'aérien, cette mesure doit également s'appliquer à l'intégralité du transport international, en premier lieu le secteur maritime. Il est du devoir de la France et de l'Europe de porter cette vision transnationale, en premier lieu auprès des signataires de l'Accord de Paris. Même si l'adoption par les signataires de ce mode de comptabilisation du transport international auprès de la Conférence des parties (COP) prendra du temps, ce point ne saurait être de nature à limiter la lucidité nationale sur la contribution réelle de la France au forçage radiatif planétaire ni à freiner sa trajectoire efficiente de transformation.

Une fois cette mesure adoptée et intégrée, la définition d'un budget carbone et d'une trajectoire relève typiquement d'une décision des pouvoirs publics. Au niveau monde, nous

184 Cette même recommandation portait sur l'intégration des émissions du transport aérien et maritime international attribué à la France au sein des budgets carbone nationaux. Proposition qui n'a pas été reconduite ans le millésime 2020, car prise en compte "d'une certaine façon" dans la loi énergie-climat de novembre 2019, qui dans ses articles 2 et 3 a opté pour l'insertion des transports internationaux sous un plafond indicatif dès le 1er janvier 2022, hors budgets carbone. L'article L.222-1 B du Code de l'environnement est ainsi modifié comme suit : Pour chacune des périodes mentionnées au même article L. 222-1 A, il définit également un plafond indicatif des émissions de gaz à effet de serre générées par les liaisons de transport au départ ou à destination de la France et non comptabilisées dans les budgets carbone mentionnés audit article L. 222-1 A, dénommé "budget carbone spécifique au transport international". Cette loi n'a toutefois pas encore été traduite dans la réglementation, puisque les décrets les plus récents concernant la SNBC, par lesquels les budgets carbone sont définis, n'y font, en février 2021, pas encore mention.

185 <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Synth%C3%A8se%20provisoire%20des%20hypoth%C3%A8ses%20et%20r%C3%A9sultats%20pour%20les%20exercices%202018-2019.pdf>

avons vu que les objectifs fixés par la gouvernance internationale sont insuffisants, cela signifie, s'ils étaient maintenus, qu'il faut que les autres secteurs fassent un effort supplémentaire afin de rester au global dans le budget carbone des « 2°C » (environ 990 GtCO<sub>2</sub>eq<sup>186</sup>). Quel que soit le niveau de gouvernance, une fois le budget global fixé, les secteurs doivent se partager le gâteau, sachant qu'il n'y aura pas de deuxième service. Ainsi le budget carbone de la SNBC est fixé à 5,4 GtCO<sub>2</sub>eq entre 2018 et 2033 répartis entre différents secteurs d'activités : quelle serait la part du gâteau pour le transport aérien ? La ligne neutre, que nous avons suivie dans ce rapport, serait d'ajouter les 27,5 MtCO<sub>2</sub> du transport aérien pour 2018 (amont inclus et révisés ultérieurement avec la mesure en MtCO<sub>2</sub>eq) et de diminuer ce budget de 3,39 % tous les ans. Si on considère que l'aviation doit moins diminuer, alors les autres secteurs (agriculture, logement, ...) doivent faire plus d'effort. Est-ce acceptable ? Le débat mérite selon nous d'être ouvert clairement, factuellement et publiquement.

### 6.3 Identifier une instance officielle nationale chargée de piloter la baisse des émissions

**Une fois ces objectifs établis, un organisme doit pouvoir assurer, de manière objective et indépendante, le suivi et le pilotage de la réduction des émissions du secteur aérien, et en assurer la conformité à la trajectoire retenue de décarbonation. Il s'agit en particulier :**

- D'obtenir une évaluation fiable, année après année, des émissions réelles du secteur, réalisée par lui-même ou par un autre organisme ; les compagnies aériennes opérant en Europe ont déjà l'obligation de rapporter leurs émissions de CO<sub>2</sub>, mais sans prendre en compte les effets hors CO<sub>2</sub> ; il faudra donc développer cette comptabilité.
- D'évaluer les perspectives d'évolution pour les prochaines années de ces émissions dans le cadre réglementaire et le contexte sociétal existant.

**Deux stratégies de pilotage sont applicables.**

#### Stratégie du contrôle

L'organisme de suivi se contente de retranscrire au secteur la contrainte fixée par la SNBC comme une obligation légale. Il ne se préoccupe pas de chercher à savoir comment le secteur va s'adapter pour répondre à cette contrainte, mais doit en revanche pouvoir sanctionner les éventuels manquements. Cette stratégie est simple à mettre en œuvre et laisse aux acteurs du secteur le choix des usages et des liaisons qui seront conservés.

Cette stratégie n'est par ailleurs applicable que si sa mise en œuvre n'induit pas de distorsion de concurrence. En d'autres termes, une contrainte réglementaire sur les émissions globales du secteur devra in fine être retranscrite en une contrainte par compagnie. Nous identifions trois approches possibles :

1. Une répartition décidée par l'organisme de pilotage, qui risque d'être in fine imposée aux compagnies, potentiellement à l'issue de longues négociations.
2. Une répartition décidée collégialement par le secteur lui-même et ses instances de représentation. Là également, les risques de non-convergence dans un contexte fortement concurrentiel sont élevés.
3. Une répartition prenant la forme d'une vente aux enchères ou d'un échange de quotas d'émissions.

Si cette stratégie est retenue, elle reviendrait donc probablement à réintégrer de manière durable l'aviation dans le marché européen du carbone (EU-ETS), en veillant à une bonne complémentarité avec le mécanisme de compensation déjà mis en place par le secteur (CORSIA). Cette proposition est détaillée en infra.

#### Stratégie de planification

Dans cette stratégie, l'organisme de pilotage compare les chiffres d'émissions prévues pour les années à venir à la trajectoire fixée par la SNBC afin de proposer des évolutions réglementaires garantissant l'alignement avec la trajectoire de décarbonation fixée. En cas de nécessité de sobriété, seront en priorité interrogés les usages et liaisons estimés les moins prioritaires, tout en garantissant le respect de critères sociaux et sociétaux d'équité et d'acceptabilité. Le choix reviendra à l'organisme de pilotage qui devra pour atteindre ses objectifs disposer d'outils législatifs, fiscaux et opérationnels adéquats.

Au-delà du potentiel sentiment d'ingérence de la part de l'organisme de pilotage vis-vis du secteur aérien, cette stratégie est plus difficile à mettre en place à l'échelle transnationale, car cela suppose une convergence de points de vue quant à la priorisation des usages. Une consultation démocratique et paneuropéenne sur ce sujet (par exemple via des comités citoyens représentatifs au sein de chaque pays<sup>187</sup>) pourrait constituer le premier chantier concret dans l'implémentation de cette stratégie.

#### À qui confier cette mission de pilotage ?

La DGAC (Direction générale de l'aviation civile) est l'une des options. Toutefois, ce service assure à la fois des missions d'autorité régulatrice et un travail de prestation, et il est actuellement financé par le trafic aérien, ce qui peut le mettre en situation de conflit d'intérêt. La DGEC (Direction générale de l'énergie et du climat) est une alternative intéressante, puisqu'elle dispose d'un département de lutte contre l'effet de serre.

### 6.4 Défendre un projet d'harmonisation entre CORSIA et les ETS régionaux

La mise en place de CORSIA comme régime de compensation à l'échelle mondiale interfère avec le fonctionnement d'autres systèmes régionaux de régulation tels que l'EU-ETS, qui agit à la fois sur le trafic aérien international entre états de l'UE mais également sur le trafic domestique. L'abandon d'EU-ETS au profit de CORSIA aurait pour effet de libérer le trafic do-

mestique de toute contrainte, puisque non couvert. Or en 2018, l'activité aérienne mondiale (en RTK, Revenu Ton Kilometers : capacité d'emport de passagers et de fret en tonne métrique multipliée par la distance parcourue) se composait à 69.4% de trafic international contre 30.6% de trafic domestique<sup>95</sup>. Le rapport d'Airbus des prévisions de trafic sur la période 2019-2038<sup>96</sup> laisse en outre envisager un scénario un taux de croissance composé annuel pour les vols domestiques de 4.4% (contre 3.9% pour les vols internationaux). Ce chiffre, principalement porté par la croissance importante du trafic domestique en Chine et en Inde, incite d'autant plus à la prudence quant au potentiel décarbonant de CORSIA.

Rappelons que CORSIA a été défini par les acteurs du secteur eux-mêmes. Afin d'éviter une double comptabilité des émissions avec EU-ETS, ces derniers ont même proposé à l'OACI que CORSIA se substitue à toute autre mesure ou législations carbone régionales, en justifiant la nécessité d'un traitement différent du fait du caractère international de l'activité. En dépit de sa portée internationale, cette initiative nous paraît regrettable à plus d'un titre.

D'une part, nous avons montré à la section 5.9.5.3 que CORSIA constituait une réponse insuffisante aux enjeux de décarbonation du secteur, puisque le dispositif permet d'espérer au mieux une stabilisation des émissions, uniquement par compensation, au niveau de 2019, et non une diminution. En outre, le recours à la compensation, même si le principe a priori est valable sur le plan algébrique, n'a pas le même effet qu'une réduction pilotée. En investissant dans des projets "verts", la compensation ajoute des intermédiaires dans la mise en œuvre de la décarbonation, donc augmente le niveau de risque. Par ailleurs, le caractère immédiat de réduction de GES induite par ses projets n'est pas garanti<sup>188</sup>, alors que le temps joue contre nous dans la lutte contre le réchauffement climatique.

D'autre part, rappelons que jusqu'alors le secteur aérien occupe aujourd'hui une position privilégiée au sein d'EU-ETS. Si de manière générale 45,5% des crédits ETS (appelés EUA - European Union Allowances) ont été alloués gratuitement en 2018 tous secteurs confondus, l'aérien fait figure d'exception, puisqu'il a eu droit à des allocations gratuites à hauteur de 85% de ses besoins<sup>189</sup>. Alors que la stratégie européenne de décarbonation prévoit un niveau d'émissions de CO<sub>2</sub> en 2030 inférieur de 40% à celui de 1990<sup>190</sup>, ce qui pour le secteur aérien signifierait un objectif de niveau d'émissions de 50 MtCO<sub>2</sub> en 2030, la commission européenne a relevé ce dernier à 111 MtCO<sub>2</sub>, arguant de la difficulté pratique que pose la question de sa décarbonation. De ce fait, l'UE a donc réalisé un arbitrage implicite en faveur du secteur aérien et comptait ainsi sur un effort plus important des autres secteurs pour atteindre son

objectif de réduction des émissions. Il est regrettable que cette "faveur" n'ait pas convaincu le secteur.

Tous les systèmes ETS existants, (EU-ETS compris) sont par nature multi-secteurs et multi-industries et sont prévus pour être "liés", en ce sens que les crédits y sont en principes échangeables. L'aviation a été intégrée au système européen (EU-ETS) en 2010 afin d'y inclure l'aviation internationale et également les vols domestiques (départ et arrivée dans un même pays de l'Union). À titre d'exemple, le système ETS de la Suisse (hors UE) lancé en 2019 intègre également l'aviation internationale et domestique (intra Suisse). Les deux systèmes sont "liés", permettant aux opérateurs d'aéronef de ne pas subir de double taxation (un vol n'est jamais soumis aux deux systèmes mais à l'un ou l'autre) et d'acquérir des crédits dans les deux systèmes de compensation qui sont interopérables ("one stop shop"). La solution qui a été implémentée consiste pour les opérateurs à recenser et comptabiliser les vols et le CO<sub>2</sub> associé de la Suisse et intra Suisse à l'ETS suisse d'une part et les vols et le CO<sub>2</sub> associé de la région UE vers la Suisse à l'EU-ETS. Une façon de résumer cette ségrégation étant "tous les vols au départ d'une région/pays ayant son ETS Aviation propre sont associés au système ETS de la région/pays de départ". Ce système évite le double comptage des vols et les distorsions de marchés puisque tous les opérateurs sont alors soumis aux mêmes règles de recensement et de compensation. Cette expérience réussie pourrait servir d'exemple dans le cas d'une solution composite EU-ETS / CORSIA que nous détaillons en infra.

### **CORSIA ou EU-ETS : Que choisir ?**

Malgré la dimension internationale qu'elle donne aux marchés du carbone du secteur l'abandon total d'EU-ETS au profit de CORSIA par le transport aérien pose une question de fond : pourquoi l'aérien aurait droit à un autre prix du carbone que le reste de l'économie ? Laisser CORSIA prendre la place d'une partie de la législation EU-ETS serait un terrible aveu de manque d'ambition écologique de la part de l'UE, puisqu'elle laisserait le secteur aérien une complète autonomie pour mettre en place un système incitatif de réduction des émissions, alors même qu'elle s'est dotée d'un appareil par définition multisectoriel. De plus, il est important de souligner que les vols domestiques de l'Europe (et de tout autre pays tels les USA, la Chine ou l'Inde) ne seraient pas comptabilisés. En effet, selon une étude de CE Delft<sup>191</sup> CORSIA unique afficherait au mieux une compensation d'environ 20% des émissions mondiales du secteur aviation sur 2021-2035, et ne permettrait selon nos calculs que de compenser qu'une très maigre part des émissions françaises sur 2021-2050. En outre, en cas de croissance nulle ou négative des émissions par rapport à 2019, CORSIA sera sans effet. Ces considérations ne sont pas de nature à encourager l'innovation dans l'aéronautique bas carbone alors que des financements publics massifs sont accordés.

La proposition opposée - exclure CORSIA de l'espace européen au profit de l'EU-ETS - a l'avantage de ne pas poser les problèmes relevés précédemment : une augmentation du prix des EUAs (European Union Allowances, qui sont les crédits du

188 C'est typiquement le cas des projets de reforestation, dans lesquels du carbone émis aujourd'hui est échangé contre une capture ultérieure, puisque les arbres ne poussent pas immédiatement.

189 C'est ce qui explique que le coût de l'achat des crédits carbone ne représente aujourd'hui que moins d'1% du prix total du billet. Voir [https://theshiftproject.org/wp-content/uploads/2019/06/2019-05-31\\_Avion-climat-et-fiscalite-C3%A9-Petit-manuel-dauto-d%C3%A9fense-intellectuelle\\_V3.pdf](https://theshiftproject.org/wp-content/uploads/2019/06/2019-05-31_Avion-climat-et-fiscalite-C3%A9-Petit-manuel-dauto-d%C3%A9fense-intellectuelle_V3.pdf)

190 Council of the European Union, 2017. Non-ETS (ESR): WPE 2 March – Commission presentation on 2030 GHG emission reduction target (WK 2310/2017 INIT. Brussels, 01 March 2017.

191 <https://cedelft.eu/en/publications/1924/a-comparison-between-corsia-and-the-eu-ets-for-aviation>

système EU-ETS), des crédits solides dont la part d'allocation gratuite est librement définie et contrôlée par l'UE, obligeraient l'industrie dans son ensemble à muter et à s'adapter. Le signal prix rendrait compte au mieux des externalités environnementales négatives engendrées par l'aérien. Cette voie pose par contre un problème politique : CORSIA a pour ambition d'emmener le monde entier et notamment des zones où la mise en place d'un système ETS est peu probable, même sur le long terme. Si l'Europe se désolidarise totalement du projet, la question de la survie du programme CORSIA se pose. À noter en outre qu'un tel scénario, même s'il est bien plus ambitieux que CORSIA, n'en est pas moins en pratique insuffisant au regard des exigences énoncées dans les Accords de Paris. En effet, l'aérien a une position privilégiée dans le système EU-ETS européen : si de manière générale 45,5% des crédits ETS ont été alloués gratuitement en 2018 tous secteurs confondus, l'aérien a eu droit à des allocations gratuites à hauteur de 85% de ses besoins, et fait une nouvelle fois figure d'exception. Ainsi, contrairement aux autres secteurs intégrés aujourd'hui dans l'EU-ETS qui ont vu leurs émissions baisser en 2019, celles du secteur aérien ont augmentées de 1,5%.

### **Pour une solution composite CORSIA et EU-ETS**

Cette voie est plus complexe mais semble être la plus à même de répondre de manière pragmatique aux enjeux climatiques. Plusieurs systèmes peuvent être envisagés. L'alternative présentée ici est un mix "50/50" qui verrait l'ensemble des vols en partance de l'EEA+ (European Economic Area) soumis à l'EU-ETS, lorsque les vols en provenance d'un pays hors-EEA+ seraient soumis à CORSIA. "50/50" exprimant donc le concept que le flux de trafic quittant l'Europe et celui entrant seraient donc assignés respectivement à l'ETS et à CORSIA, ce qui serait une sorte de complément à l'ETS actuel qui lui couvre déjà les vols Intra européens.

Un tel scénario, similaire à celui mis en place entre l'ETS de l'Union européenne et l'ETS de la Suisse dans son principe (séparation des flux à rapporter), verrait les émissions domestiques et intra UE entièrement couvertes par le système EU-ETS, sans recouvrement de CORSIA. Les vols entre un pays de l'Union et un pays non européen seraient ainsi couverts à hauteur de 50% par l'EU-ETS (vols au départ de l'UE vers pays tiers) et à 50% par CORSIA (vols de pays tiers vers l'UE). Ce scénario verrait 62% des émissions du secteur initialement couvertes par le « full scope » être couvertes par l'ETS. Un grand avantage d'associer les vols au départ de l'Europe à l'EU-ETS serait la prise en compte possible par l'ETS dans le futur de polluants locaux de types NOx qui sont principalement liés au décollage, voire des effets hors CO<sub>2</sub>.

L'application d'une telle solution reste néanmoins incompatible avec l'objectif de limiter le réchauffement climatique sous la barre des 1,5-2°C. Limiter les émissions au plafond de 2019 est largement insuffisant et la grande majorité de crédits carbone alloués au secteur aérien le sont aujourd'hui à titre gratuit. CORSIA ainsi que l'EU-ETS se doivent donc d'être évolutifs s'ils veulent permettre une réelle décroissance des émissions du secteur. La France doit faire entendre sa voix pour que le marché carbone européen puisse le plus rapidement possible assurer une décarbonation de l'économie via la réduction du nombre de quotas délivrés gratuite-

ment. Le nombre total de quotas mis aux enchères chaque année doit lui aussi diminuer progressivement pour atteindre une trajectoire de décroissance compatible avec un scénario 2°C, à savoir -5% par an à compter de 2018 sous l'hypothèse d'alignement sur l'objectif mondial. Cette décroissance est aujourd'hui de 2,2%, largement insuffisante compte tenu du fait qu'à peine plus de la moitié de l'activité économique européenne participe au marché carbone. La France doit aussi militer auprès des instances internationales pour que l'OACI revoit régulièrement les seuils d'émissions présents dans CORSIA à la baisse. Une stabilisation du niveau d'émissions d'un secteur est en effet incompatible à plus ou moins long terme avec la décarbonation de l'économie mondiale, et les autres secteurs ne pourront durablement compenser un effort auquel l'aviation n'aura pas consenti.

Le mix 50/50 est ainsi le meilleur scénario au niveau européen, en termes de performance environnementale et de viabilité. Il est difficile de le décliner au niveau français uniquement. Ce scénario nécessite une forte coordination au sein de l'Union Européenne afin de faire valoir cette position de façon unie au niveau de l'OACI. Les autres États de la région EUR-OACI (plus large que l'EEA) n'étant pas impliqués directement par l'ETS pourraient aussi plaider pour cette solution, créant ainsi une position OACI régionale. À défaut d'approche commune régionale, les états EEA pourraient appliquer CORSIA mais en émettant chacun des dérogations nationales aux SARPs (Standard And Recommended Practices) CORSIA en exemptant au niveau des rapports annuels et de la compensation CORSIA tous les vols au départ de leur territoires propres (car couvert par l'ETS), procédure dérogatoire nationale permise en principe au niveau de l'OACI. La mise en place de cet espace législatif mixte ETS et CORSIA clair permettra l'arrivée des solutions techniques qui font l'objet de ce rapport de la manière la plus efficace possible.

## 7 Proposition et évaluation de mesures de décarbonation sur le périmètre France

### 7.1 Introduction

La majorité des propositions suivantes sont déjà connues de l'industrie aéronautique et du transport aérien. **L'objectif est d'éclairer le contenu de ces propositions** du point de vue de la technique, des opérations, de la faisabilité, des contraintes du secteur et des freins à leur mise en œuvre, des externalités engendrées (notamment en termes de ressources énergétiques, d'usage, d'activité économique, de concurrence et d'emploi) et enfin de chiffrer l'impact carbone associé.

Il est important à ce stade de noter que dans l'hypothèse où les axes présentés et chiffrés en infra ne seraient in fine pas suffisants pour rester dans l'enveloppe du budget carbone impartie au secteur, l'effort restant de réduction des émissions, à iso-budget carbone, devra nécessairement se faire via de la sobriété d'usage. Ainsi, si le lecteur est libre d'apprécier favorablement ou défavorablement telle ou telle mesure, ou d'imaginer en limiter la portée, les réductions d'émissions non réalisées se traduiront nécessairement par un effort de sobriété supplémentaire.

Par ailleurs, **parmi l'ensemble des mesures proposées dans ce rapport, les plus efficaces en termes de réduction d'émissions sont aussi les plus incertaines, car porteuses de risques à plusieurs niveaux** (techniques, industriels, financiers, réglementaires, marché) et nécessitant une bonne coordination à l'échelle internationale. Mettre en place pleinement dès aujourd'hui les mesures les plus simples est donc stratégique : cela permet de gagner du temps pour la mise en place de mesure plus complexes et de préparer une éventuelle transformation de fond du secteur. Par voie de conséquence, toute "retenue" dans l'application des mesures court terme précipitera la mise en place anticipée de mesures à plus fort niveau de risque ; moins préparées, celles-ci seront alors soit moins efficaces en termes de réduction de GES, soit plus disruptives en termes socio-économiques.

Les trajectoires de référence au niveau France sont construites sur les mêmes principes que les trajectoires Monde présentées en 5.9.4, en se basant sur les budgets carbone France présenté en 5.9.3 et le périmètre présenté « DGAC » présenté en 5.9.2.

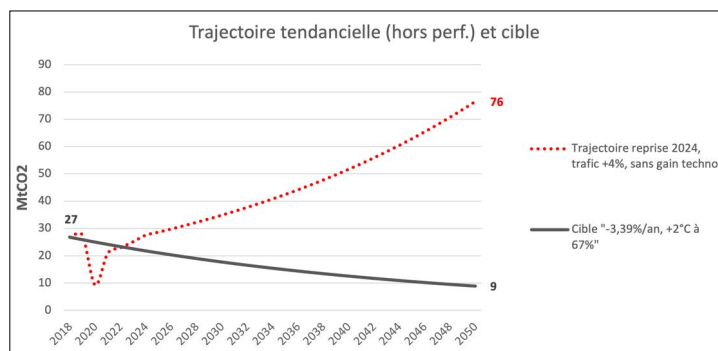


Figure 34 - Trajectoires tendancielle et cible - France

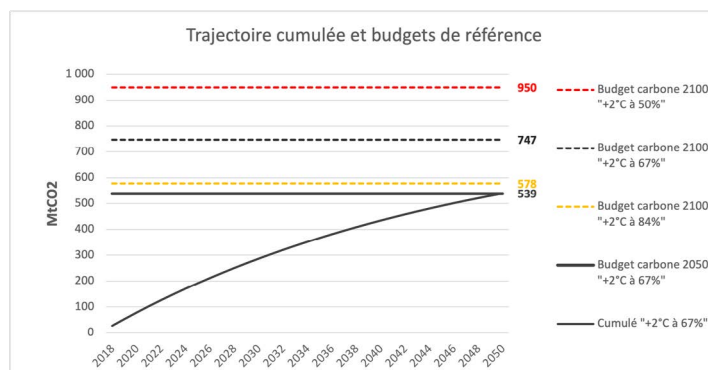


Figure 35 - Trajectoire cumulée et budgets carbonés de référence - France

Prendre une hypothèse de croissance similaire au niveau France et Monde est discutable car la croissance du trafic aérien mondial se fait essentiellement hors de France et d'Europe. Néanmoins, il s'agit, là aussi, d'une hypothèse de travail qui a vocation à être ajustée in fine en fonction de l'atteinte ou non de l'objectif de décarbonation (cf. 5.9.4).

### 7.2 Améliorer l'efficacité énergétique et émissive du transport aérien

#### 7.2.1 Axes d'efficacité à court terme (horizon 5 ans)

##### 7.2.1.1 Décarbonation des opérations au sol

#### Axe n°1 : Décarbonation des opérations au sol

|                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|-----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Nature</b>                           | Réglementaire ; investissement (des aéroports)                                                                                                                                                                                                                                |
| <b>Périmètre d'application (cibles)</b> | Single-Engine Taxi-In ou Taxi-Out (SETI/ SETO) : Compagnies aériennes<br><br>Système de Traction des Avions au Roulage (STAR) ou Aircraft Dispatch Towing System : Compagnies aériennes et aéroport (mutualisation et électrification du parc de VL assistants et compagnies) |
| <b>Levier activé</b>                    | Sobriété, mesures d'exploitation, progrès technique.                                                                                                                                                                                                                          |

#### Éléments de contexte

**Les opérations au sol recouvrent l'ensemble des activités réalisées pendant que l'avion ne vole pas**, c'est à-dire les phases de « parking » et de « taxi » (déplacement au sol de

l'avion avant le décollage ou après l'atterrissage). Ces activités engendrent une consommation significative de kérosène, et pèsent donc dans les émissions de CO<sub>2</sub>. Les compagnies aériennes l'ont compris et poussent à limiter la consommation de kérosène lors de ces opérations.

### **Parmi les leviers mobilisables pour réduire ces émissions, on retiendra les deux principaux :**

- Ne plus recourir au groupe auxiliaire de puissance (ou « Auxiliary Power Unit » – **APU** en anglais) pendant la phase de parking.
- Réduire l'usage des moteurs de l'avion pendant son déplacement au sol (Taxi-in et Taxi-out).

#### **Levier n°1: Substituer l'usage de l'APU lorsque l'avion est statique (phase de parking).**

L'APU est un groupe auxiliaire (en général un turbogénérateur) destiné à produire de l'énergie à bord des avions pour alimenter au sol les différents systèmes de bord et, en vol, assurer la continuité de l'alimentation de ces systèmes en cas de problème moteur :

- Fonction n°1 : L'alimentation électrique (400 Hz et 28 VDC) aux systèmes embarqués
- Fonction n°2 : Le démarrage des moteurs lors du départ et en cas de panne en vol.
- Fonction n°3 : La puissance pneumatique nécessaire au contrôle de la température du cockpit et de la cabine.

Les APU sont généralement positionnées à l'arrière de l'avion, dans le cône de queue, et alimentées par le kérosène des réservoirs de l'avion. Le recours à l'APU est la principale source d'émissions de CO<sub>2</sub> lorsque l'avion est statique et représente pour l'ensemble des vols touchant le territoire français 0,4 MtCO<sub>2</sub> (1,7% de l'ensemble des émissions du transport aérien)<sup>192</sup>.

Alors que la fonction n°1 est généralement assurée par une alimentation électrique externe et que la fonction n°2 est transitoire, le maintien d'une température contrôlée (fonction n°3) de la cellule constitue l'usage principal de l'APU au sol. C'est donc sur la fonction n°3 que se trouve le gisement de réduction principal.

Pour la flotte d'Air France, la consommation de carburant annuelle relative à l'utilisation de l'APU est estimée à 45 000 tonnes de kérosène et les émissions associées de CO<sub>2</sub> à 0,17 MtCO<sub>2</sub> (données 2019, avec prise en compte du secteur amont). Il existe deux alternatives à l'utilisation de l'APU pour climatiser la cabine au sol. Celle principalement utilisée, l'ACU ou groupe mobile de climatisation, ne constitue pas une solution décarbonante car elle substitue à l'APU un moteur diesel sur châssis mobile. La seconde consiste à utiliser un groupe de parc électrique (souvent intégré en sous-sol au niveau de la porte d'embarquement) et comporte un potentiel décarbonant important pour des pays dont le mix électrique

est décarboné comme la France (réduction des émissions de CO<sub>2</sub> d'un facteur 1000 par rapport à l'APU par kW de froid produit). Elle demeure moins utilisée compte tenu de l'investissement significatif à consentir pour équiper les installations aéroportuaires<sup>193</sup>. Qui plus est, sur certains aéroports disposant des équipements, ceux-ci peuvent être insuffisants et ne pas réussir à climatiser la cabine en cas de fort ensoleillement, ce qui pousse à utiliser l'APU. Nous noterons que les aéroports CDG (Roissy Charles de Gaulle) et ORY (Orly), ainsi que TLS (Toulouse-Blagnac) imposent un temps maximum d'utilisation de l'APU au départ et à l'arrivée (respectivement 10 et 5 min). D'autres terrains proposent des mesures moins restrictives. Un axe de progrès serait d'aligner tous les aéroports sur ces mesures, sans que le gain engendré ne soit mesurable de par la diversité des situations qui forcent l'utilisation de l'APU.

#### **Levier n°2: Réduire l'usage des moteurs<sup>194</sup> de l'avion pendant son déplacement au sol (Taxi-in et Taxi-out).**

Les phases de roulage avant décollage (taxi-out) et après atterrissage (taxi-in) sont des phases pendant lesquelles les avions utilisent jusqu'à 4% de leur carburant pour se propulser à l'aide de leurs moteurs<sup>195</sup>. Ces activités engendrent des émissions de CO<sub>2</sub> de l'ordre de 1 MtCO<sub>2</sub>/an<sup>196</sup> sur les phases de roulage sur le sol français, sans le secteur amont.

Pour réduire cette consommation de carburant, la première possibilité consiste à n'utiliser qu'un seul moteur. La poussée générée par un moteur au ralenti est souvent suffisante pour assurer sa propulsion au roulage, notamment sur les appareils les plus récents (par exemple : sur les moteurs de la famille LEAP équipant les A320neo ou B737max). C'est ce qu'on appelle le « Single Engine Taxi-In » (SETI) ou « Single Engine Taxi-out » (SETO).

Un certain nombre de compagnies aériennes (50% à dire d'expert) pratiquent déjà le SETI. Le SETO est en revanche moins utilisé<sup>197</sup> (20% à dire d'expert). Certaines contraintes de sécurité (risque de découvrir un incident à l'allumage en seuil de piste et d'un retour au bloc) ou d'opération (manœuvres moins aisées) détaillées en Annexe 2 (cf. 12.2) peuvent en partie expliquer les difficultés à mettre en œuvre ces pratiques.

193 Le sujet de la tarification du service par l'aéroport aux compagnies/assistants est un sujet difficile. Tenant compte du niveau d'investissement, le tarif associé est difficilement acceptable par les utilisateurs et préfèrent s'en remettre à l'utilisation de l'APU (plus grande flexibilité, notamment entre points au contact équipés PCA et les points au large non équipés). L'aéroport d'Orly n'a ainsi jusqu'à présent jamais décidé d'investir dans les PCA du fait d'un non-alignement tarifaire avec les compagnies. Il reste à inventer un mécanisme tarifaire suffisamment incitatif pour les utilisateurs, sans doute à moduler en fonction du temps d'utilisation, du type avion et du stand utilisé (contact ou large). Peut-être aussi l'aéroport devrait-il consentir sur ce type d'équipement « vert » un ROCE au rabais car finançable via green bond (donc répercuter le faible coût de l'argent sur le tarif).

194 La limitation des inverseurs de poussée à l'atterrissage n'a pas été étudiée dans ce rapport.

195 <https://www.safran-landing-systems.com/fr/systemes/roulage-elec-trique>

196 Voir note de calcul

197 easyJet pratique le single engine taxi out (SETO), avec une coordination particulière avec l'ATC qui surveille que tout se passe bien lors du démarrage du 2ème moteur.

192 Voir note de calcul

Une autre alternative consisterait à recourir à un système de traction des avions au roulage (parfois connu sous le nom de la principale marque *Taxibot*). Il s'agit d'un système de chariot tracteur amenant l'avion au seuil de piste et allant le chercher, semi-robotisé, et piloté directement par le pilote. Cela permettrait de garder les deux moteurs éteints pendant les phases de roulage. Ce système de traction fonctionne au diesel mais avec une consommation bien moindre (de l'ordre de -75%<sup>198</sup>) que celle d'un turboréacteur.

Pour aller plus loin, ces chariots tracteurs pourraient être alimentés électriquement à courte échéance. Dans les deux cas, la mise en œuvre de ce système de traction nécessite un certain nombre de modifications sur l'avion et une formation des pilotes, réalisable en une année grâce à la formation continue.

Par ailleurs, le fonctionnement de l'aéroport par hub fait qu'il y a des plages horaires où les avions partent et arrivent en même temps, même si les effets de pic d'activité peuvent différer significativement d'un hub à l'autre. Couvrir l'ensemble des départs et arrivées nécessiterait une quantité très significative de systèmes de traction. Un taux de 30% d'utilisation est une valeur ambitieuse mais accessible d'ici 5 ans, avec une utilisation préférentielle pour les phases de Taxi-out (pour lesquelles le SETO est peu appliqué, cf. plus haut).

## Description détaillée

### Levier n°1

Substituer d'ici 5 ans l'APU par des groupes de parcs électriques pour les aéroports de Paris-Charles de Gaulle et Orly sur tous les points de parking.

### Levier n°2

- Généraliser la pratique du roulage après l'atterrissage (Taxi-in) avec un seul moteur allumé (SETI).
- Généraliser la pratique du roulage avant le décollage (Taxi-out) avec un seul moteur allumé (SETO) en fonction de la durée du roulage, et à l'exception du premier vol du jour et dans le respect des contraintes liées au maintien de la sécurité des vols (voir annexe 1).
- Installer d'ici 5 ans dans chaque aéroport français un service de système de traction électrique des avions au roulage et imposer le recours à un tel système à l'ensemble des compagnies aériennes pour les phases de roulage.
- Inclure dans le programme de formation des pilotes la maîtrise des systèmes de traction.

Comptabiliser pour l'ensemble des compagnies aériennes opérant en France, les appareils avec le système de traction électrique.

## Impact CO2

### Levier n°1

La substitution de l'APU par des groupes de parc électriques pour les aéroports de Paris-Charles de Gaulle et Orly permettrait une réduction de la consommation de carburant de 44 000 tonnes de kérosène par an et **une réduction des émissions de CO<sub>2</sub> associée de 0.13 MtCO<sub>2</sub>/an**, secteur amont exclus, sur base du trafic aérien de 2019. Cette estimation concerne l'ensemble du trafic opéré vers et depuis CDG et ORY.

Si on vise d'ici 2030 de généraliser l'utilisation des groupes de parc électriques sur l'ensemble des aéroports français, alors on peut atteindre 0.30 MtCO<sub>2</sub>/an, secteur amont exclus (sur base du trafic de 2019, à corriger de l'augmentation du trafic).

### Levier n°2

En considérant qu'aujourd'hui pour 50% des vols le SETI est mis en œuvre, et que pour 30% des vols le SETO est mis en œuvre, et qu'on se donne pour objectif de passer demain à respectivement 90% et 75% (compte-tenu des contraintes d'utilisation) la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> liée à la généralisation du SETI et du SETO sera immédiatement de, sur la base du trafic de 2019 et en excluant le secteur amont :

- 0,02 MtCO<sub>2</sub>/an pour la mise en œuvre du SETI seul
- 0,09 MtCO<sub>2</sub>/an pour la mise en œuvre du SETO seul

En considérant que d'ici 5 ans le système de traction électrique est généralisé dans l'ensemble des aéroport français, et utilisé pour un objectif raisonnable de 30% des vols pour la phase de Taxi out (le reste des vols mettant en œuvre le SETI/SETO) **la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> pourrait atteindre 0,15 MtCO<sub>2</sub>/an en 2025**, secteur amont exclus (sur base du trafic de 2019, à corriger de l'augmentation du trafic).

Si le système de traction électrique est déployé pour 90% des Taxi-in et Taxi-out, ce qui serait un objectif raisonnable pour 2035, les gains seront de 0,24 MtCO<sub>2</sub>/an secteur amont exclus (sur base du trafic de 2019, à corriger de l'augmentation du trafic).

## Externalités engendrées

### Impacts sur l'emploi

• **Pas de perte d'emploi** par la mise en place du SETI/SETO ou par l'utilisation de groupes électriques en remplacement de l'APU, qui sera toujours nécessaire à bord des avions en cas de non-disponibilité des groupes électriques ;

• **Gain d'emploi** par la création d'un nouveau marché pour le service de système de traction électrique et la filière industrielle des groupes électriques. La création de valeur peut se faire sur le territoire national : la filière industrielle de conception et production de trac-

teurs électriques est déjà implantée en France (à titre d'exemple 3 usines de la société TLD sont situées dans le centre ouest<sup>199</sup>).

### Impacts sur les compagnies aériennes et les aéroports

- Évolution des procédures de pilotage et de contrôle à mettre en œuvre (voir Annexe pour davantage de détail).
- Pas de perte de compétitivité ou de distorsion de concurrence car les contreparties proposées concernent toutes les compagnies aériennes opérant sur les aéroports français.
- Réduction des nuisances sonores et des pollutions NOx autour des aéroports.
- L'usage généralisé de groupes électriques ou de systèmes de traction électriques constitue une source de revenus pour les aéroports qui peuvent vendre le service aux compagnies aériennes (création de valeur sur le territoire français). Ces dernières effectuent de substantielles économies en carburant.
- Les coûts de mise en place du système de traction pourraient être financés par la redevance aéroportuaire, ou par mutualisation optimisée des équipements par les handlers et/ou compagnies, à l'image du financement des push-back aujourd'hui<sup>200</sup>.
- Le plan de circulation au sol pourrait également s'en trouver modifié.

### Proposition de gestion des externalités

Attention aux impacts sur la ponctualité liée à la dépendance induite des systèmes de tractage. Un retard au départ peut en effet induire une accélération en vol, donc une consommation accrue. On pourra par exemple privilégier un départ à l'heure avec traction thermique si le coût écologique de l'accélération est supérieur au gain de traction électrique.

199 <https://www.tld-group.com/fr/le-groupe/capacite-industrielle/>

200 L'autorité aéroportuaire pourrait inciter les handlers et compagnies à une plus grande mutualisation de ce parc. Ce n'est pas un chantier facile car les assistants pensent perdre en flexibilité mais c'est pourtant un jeu gagnant-gagnant : moins de surface de stationnement nécessaire sur l'apron et moins de compétition entre assistants pour arriver le premier sur le poste. Une solution serait de fonctionner via une coopérative de location d'engins d'assistance qui permet par ailleurs une meilleure structure tarifaire. Résultat : moins de véhicules, moins de congestion, une légère diminution des surfaces construites et moins d'émissions. L'aéroport doit être orchestrateur d'un tel chantier par des mesures d'incitation fortes, jusqu'à les rendre obligatoires. C'est le rôle d'une Autorité aéroportuaire responsable.

### 7.2.1.2 Remplacement des avions à turboréacteurs de petite capacité par des appareils à hélices

#### Axe n° 2 : Remplacement avions à turboréacteurs de petite capacité par des appareils à hélices

|                                         |                                                       |
|-----------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| <b>Nature</b>                           | Obligation réglementaire portant sur les technologies |
| <b>Périmètre d'application (cibles)</b> | Vols opérés par des petits turbojets                  |
| <b>Levier activé</b>                    | Technologique (Efficacité énergétique)                |

### Description détaillée

**Les turbojets commerciaux de moins de 105 places (CRJ700 / 1000 et Embraer 135, 145, et 170) sont interdits sur les vols intérieurs à partir de 2023 au profit des avions à turbopropulseurs.** Cela s'explique par le fait que, actuellement les turbojets commerciaux sont moins efficaces en termes de consommation de carburant par passager, les évolutions technologiques futures pourraient amener à revoir cette proposition. Ils y sont donc remplacés de fait par des turbopropulseurs (avions à hélices) moins consommateurs (typiquement ATR 72 ou 42). Lorsque le trafic est suffisant (fréquence minimale et débit de passager suffisants), les avions court-moyen courtiers de dernière génération doivent être préférés.

• **Les turbopropulseurs ont une consommation de carburant significativement plus faible que des turbojets** de capacité similaire et de même génération, comme en témoigne le graphique en annexe. À titre d'exemple, le remplacement d'un turbojet CRJ700 (consommation entre 3,2L et 6,4L / siège.100km) par un ATR72 de même capacité (consommation entre 1,8L et 2,7L / siège.100km) représente un gain de consommation de 40-45% (sur des distances comprises entre 200 et 600 NM).

• Outre la réduction de consommation de carburant, ceci a l'avantage de **diminuer de façon importante les effets climatiques hors CO<sub>2</sub>**, produits par les turbojets à leurs altitudes de croisière<sup>201</sup>.

En revanche, les turbopropulseurs ont une vitesse de croisière plus faible (de l'ordre de 550km/h contre 850km/h pour un turbojet). L'augmentation du temps de trajet associée à ce changement est faible sur les vols intérieurs, dont la durée dépasse rarement une heure et demie. Il faudrait compter environ 20 minutes de vol supplémentaires pour un vol d'une heure. Une partie de l'augmentation de la durée de vol est également dû à un aménagement des aéroports parfois favorable aux jets. C'est d'ailleurs ce temps de vol supplémentaire qui

201 <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2012JD018204>

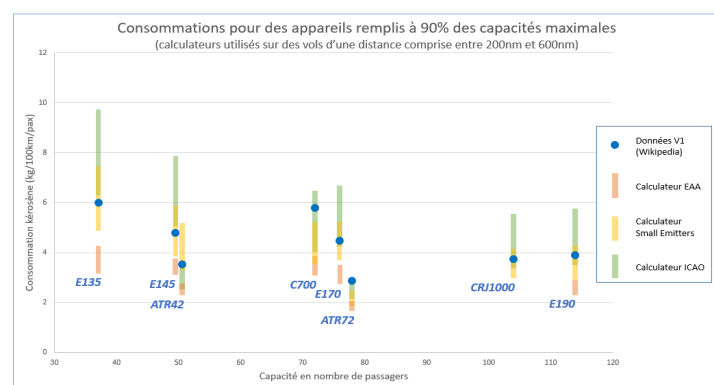
rend souvent les avions à turbopropulseurs moins compétitifs économiquement qu'un avion régional à turboréacteurs, la réduction des coûts de carburant étant allègrement compensée par l'augmentation d'autres charges (emploi des personnels navigants notamment).

## Impact CO2

L'impact a été calculé pour la compagnie Hop! Cette compagnie détient environ 50% des appareils commerciaux de moins de 105 places parmi les compagnies françaises, mais surtout 85% des turbojets < 105 places des compagnies françaises<sup>202 203</sup>.

- Les consommations des différents appareils de la compagnie Hop! et des ATR 42 et ATR 72 sont issues des calculateurs publics EEA, Eurocontrol - Small Emitters Tool et OACI: <sup>204 205 206</sup>
- La consommation annuelle de carburant a été calculée, en supposant que le trafic (pax.km) était proportionnel à la capacité de l'avion.
- Les différents cas considérés sont:
  - Trafic de la compagnie: identique au trafic de 2017 (2.54e9 pax.km<sup>207</sup>) ou trafic réduit prenant en compte un report modal vers le train (cf. 7.3.3)
  - Nouvelle flotte: remplacement des turbojets de capacité inférieure à 105 places par des turbopropulseurs, ou remplacement des turbojets de capacité inférieure à 120 places<sup>208</sup>.

Détails des consommations de kérosène par type d'avion en fonction de la capacité en nombre de passagers :



**Le calcul des émissions CO<sub>2</sub> dans les différents cas avec les hypothèses minimales et maximales est donné dans les tableaux ci-dessous (détail des calculs dans la note de calcul) :**

202 [www.airfleets.fr](http://www.airfleets.fr)

203 <http://www.flightradar24.com>

204 <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2016/part-b-sectoral-guidance-chapters/1-energy/1-a-combustion/1-a-3-a-aviation-1-annex5/view>

205 <https://www.eurocontrol.int/publication/small-emitters-tool-set-2019>

206 [https://www.icao.int/environmental-protection/CarbonOffset/Documents/Methodology%20ICAO%20Carbon%20Calculator\\_v11-2018.pdf](https://www.icao.int/environmental-protection/CarbonOffset/Documents/Methodology%20ICAO%20Carbon%20Calculator_v11-2018.pdf)

207 <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/Bulletin-Stat-traffic-aerien-2017.pdf>

208 Air France a fait un choix stratégique contraire en sortant tous ses ATR à horizon 2021 et « rationaliser » sa flotte avec des CRJ700/1000 et ERJ145/170/190.

| Chiffrage gain minimal                                   |                  |      |                               |      |
|----------------------------------------------------------|------------------|------|-------------------------------|------|
| Emissions CO2 (kt)                                       | Trafic Hop! 2019 |      | Trafic Hop! 2019 après report |      |
| Flotte Hop! actuelle                                     | 124              | /    | 69                            | /    |
| Remplacement turbojets < 105 places par turbopropulseurs | 77               | -38% | 50                            | -28% |
| Remplacement turbojets < 120 places par turbopropulseurs | 64               | -48% | 46                            | -33% |

| Chiffrage gain maximal                                   |                  |      |                               |      |
|----------------------------------------------------------|------------------|------|-------------------------------|------|
| Emissions CO2 (kt)                                       | Trafic Hop! 2019 |      | Trafic Hop! 2019 après report |      |
| Flotte Hop! actuelle                                     | 269              | /    | 150                           | /    |
| Remplacement turbojets < 105 places par turbopropulseurs | 139              | -48% | 95                            | -37% |
| Remplacement turbojets < 120 places par turbopropulseurs | 106              | -60% | 76                            | -50% |

- Sans prendre en compte le report modal, l'économie dans le cas du remplacement des turbojets de moins de 105 places **se situe entre 46 et 129kt de CO<sub>2</sub> (valeur médiane à 88kt), soit une réduction de l'ordre de 40-45% par rapport aux émissions actuelles** en prenant en compte les incertitudes sur les consommations de flotte. Après prise en compte du report modal, l'économie est de 39 kt de CO<sub>2</sub> (valeur médiane), soit près de 35% des émissions de la compagnie après report modal.
- En extrapolant aux autres compagnies françaises, le gain total pourrait être de 45 ktCO<sub>2</sub>, après report modal.
- Le gain CO<sub>2</sub> pourrait être encore augmenté en étendant la mesure à toutes les compagnies (françaises ou non) opérant sur le sol français.

En réintégrant les émissions liées à l'amont, le gain de CO<sub>2</sub> serait de 58 ktCO<sub>2</sub>, soit 0,21% des émissions de 2019. En considérant un remplacement progressif entre 2021 et 2025 (scenario plutôt optimiste) et en projetant sur 2026-2050 (ce qui suppose que le ratio de vols régionaux reste constant sur cette période), nous pouvons espérer une diminution de 2,8 MtCO<sub>2</sub> par rapport au scenario de référence (cf. § 7.1)

## À noter :

Ces calculs sont réalisés sur la base de calculateurs publics avec des hypothèses minimales et maximales. Le modèle pourrait être affiné ligne par ligne en regardant notamment les lignes de plus grande distance pour lesquelles la comparaison de performances (consommation et temps de trajet) entre les turbojets et les turbopropulseurs pourrait être moins favorable.

De plus, ces calculs sont réalisés sur des hypothèses de remplacement de flotte à partir d'une flotte existante. À partir de données privées (type Flight Radar ou OAG), il serait possible de regarder ligne par ligne les gains de CO<sub>2</sub> en remplaçant les avions directement par ceux de plus faible consommation.

L'étude ne prend pas en compte les vols effectués dans les DOM/TOM opérés par d'autres compagnies françaises car ils sont déjà très majoritairement effectués par des avions à turbopropulseurs.

## Impact hors CO<sub>2</sub>

Les turbopropulseurs volent à plus basse altitude que les turbo-réacteurs (plafond à 7,6 km, contre 12,5 km pour les turbojets). Or, l'altitude à laquelle les émissions (y compris hors CO<sub>2</sub> : eau, particules, traînées de condensation...) ont lieu peut impacter le forçage radiatif qu'ils entraînent, selon Marquart et al.<sup>209</sup>

- Il semble que le forçage radiatif des émissions hors CO<sub>2</sub> tende à diminuer quand l'altitude d'émission diminue, mais cela est relatif à chaque polluant et dépend également de la latitude<sup>210</sup>.
- Le forçage radiatif peut être amené à augmenter de façon conséquente si les émissions ont lieu dans la stratosphère. Ceci est en particulier dû à l'eau qui y demeure plus longtemps, au lieu de rejoindre le cycle de l'eau comme elle le fait classiquement quand elle est émise à plus basse altitude<sup>211</sup>.
- Il a été montré qu'une modification de l'altitude de l'ordre de quelques centaines de pieds peut limiter la formation de traînées de condensation<sup>212</sup> responsables d'un forçage radiatif particulièrement important<sup>213</sup>. Cette modification dépend toutefois de paramètres locaux et des conditions météorologiques.

Ces effets doivent cependant être approfondis pour quantifier l'impact global.

## Externalités engendrées

### Qualité de service

- Temps de trajet : Les temps de vol sont légèrement augmentés (moins de 30 min de plus pour un Paris-Toulouse<sup>214</sup>). Un allongement supplémentaire vient du fait que les passagers des avions propulsés par turbopropulseurs débarquent souvent dans les terminaux les plus éloignés, notamment dans les gros aéroports, ce qui pourrait être revu en cas d'application de la mesure.
- "Standing" : le "standing" de l'avion à hélices peut être perçu comme inférieur. Préjugé d'une sécurité moindre alors qu'elle est équivalente.
- Confort : Le bruit extérieur des appareils à turbopropulseurs est inférieur à celui des jets régionaux (pour un ATR, 10-15 dB de moins en cumulé qu'un jet de taille similaire)<sup>215</sup>. Le bruit intérieur est similaire (environ 79 dB).

### Externalités économiques

- Coût du remplacement des appareils (à mettre en regard de l'aide publique à AF).
- Coûts de maintenance des turbopropulseurs plus élevés (opérateurs).
- Coûts de personnel, le léger allongement du temps de vol demandant plus de personnel navigant.
- La rentabilité économique des turbopropulseurs est fortement liée au prix du kérosène.
- Le stationnement sur des points au large ou en faux-contact (point contact sans utilisation de la passerelle) est économiquement favorable aux régionaux non acoustables, le tarif large ou faux-contact étant bien inférieur au tarif contact avec passerelle.

### Externalités sur les emplois

- Le léger allongement du temps de vol a l'avantage d'augmenter légèrement les emplois de personnel navigant induits, rapportés au nombre de vols.
- Déficit de revenus pour les constructeurs de jets régionaux (avionneurs canadien et brésilien).
- Augmentation de l'activité des constructeurs d'avions turbopropulseurs (ATR - européen).
- L'impact emploi est globalement positif (accélération du remplacement naturel des flottes).

### Risque de contournement ou de conséquence contre-productive

- Contournement de la règle en faisant voler des turbojets plus gros, restant autorisés, pouvant générer un développement et une augmentation de trafic.

## Proposition de gestion des externalités

### Qualité de service

- "Standing" et impression de sécurité : l'image de l'avion à hélice est à refaire. À l'époque de la mobilité bas carbone et au vu de son efficacité, son utilisation pourrait faire l'objet d'une communication en ce sens et devenir un atout pour les compagnies aériennes acceptant de substituer leurs jets, et présenter un intérêt pédagogique pour les passagers/citoyens.
- Temps de trajet : allocation d'une section dédiée aux turbopropulseurs dans les grands aéroports pour faciliter le trafic général/l'embarquement ?
- Confort : bruit équivalent ou inférieur, pas d'action nécessaire.

209 Marquart, S., M.Ponater, F.Mager, and R.Sausen, 2003: Future development of contrail cover, optical depth, and radiative forcing: Impacts of increasing air traffic and climate change. *J. Climate*, 16, 2890–2904.

210 <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2012JD018204> Voir également Marquart et al.

211 <https://archive.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/av-fr.pdf>

212 <https://www.carbone4.com/trainees-de-condensation-impact-climat/>

213 <https://www.nature.com/articles/s41467-018-04068-0>

214 <http://www.flightradar24.com>

215 <http://noisedb.stac.aviation-civile.gouv.fr/bdd>

### Externalités économiques

- Coût de maintenance des compagnies : le système de bonus / malus aide les compagnies à compenser les coûts de maintenance.
- Possibilité de financement vert (green bonds) pour tout avion de consommation au moins 30% inférieure à celle de l'appareil mis hors de service.
- Pas de gestion des externalités pour les aviateurs.

### Externalités sur les emplois

Bilan emploi positif, pas d'action particulière

### Éviter les risques de contournement

- Risque de recours à des turbojets plus gros : conditionner les autorisations administratives d'exploiter une liaison au respect d'un taux d'occupation minimum, sans quoi l'autorisation tombe.

#### 7.2.1.3 Limiter le "Fuel Tankering"

#### Axe n°3 : Limiter le Fuel Tankering

|                   |                      |
|-------------------|----------------------|
| Acteurs concernés | Compagnies aériennes |
|-------------------|----------------------|

#### Éléments de contexte

Le « *fuel tankering* » ou « double emport » est une pratique des compagnies aériennes consistant à embarquer plus de carburant que nécessaire pour un vol afin d'éviter ou de limiter le *refueling* à l'aéroport d'arrivée.

Le carburant embarqué pour le trajet retour constitue à l'aller une masse supplémentaire entraînant une surconsommation : sur un vol moyen-courrier, typiquement 5% du carburant supplémentaire embarqué sera brûlé pour permettre le transport des 95% restants ; sur un vol long-courrier, cette proportion est de l'ordre de 30%, en fonction de la distance du vol.

Sur le périmètre intra-européen, le double emport est pratiqué, selon une étude menée par Eurocontrol <sup>216</sup> :

- à environ 10% pour des raisons opérationnelles (problème d'approvisionnement dans l'aéroport de destination, pénuries, retard, rotation courte) ;
- à environ 90% pour des raisons économiques : le coût de la surconsommation étant compensé par la différence de prix du carburant entre les deux aéroports.

Sur le périmètre intra-européen, **cette pratique fait économiser 265 M€/an aux compagnies européennes, et entraîne le rejet de 0,9 MtCO<sub>2</sub>/an pour l'ensemble de l'es-**

**pace aérien européen** (source Eurocontrol). L'utilisation de ce levier d'économie par les compagnies est variable, mais cependant assez utilisé par les compagnies de point à point moyen-courrier en Europe.<sup>217</sup>

Sur le long-courrier, les vols concernés correspondent principalement à des destinations africaines. Le ratio coût carbone sur économie réalisée y est particulièrement défavorable.

#### Description détaillée

Interdire (ou décourager, annuler l'avantage économique par de la fiscalité, ou encourager la bonne gestion du carburant) cette pratique à l'ensemble des compagnies aériennes opérant des vols au départ ou à destination de la France, sauf, à titre dérogatoire, en cas de raison opérationnelle avérée, ou lorsque le coût de l'économie réalisée rapportée à la tonne de CO<sub>2</sub> émise dépasse la valeur tutélaire du carbone (valeur de l'ordre de 500€)<sup>218</sup>.

#### Impact CO2

L'impact européen évalué par Eurocontrol est de 0,9 MtCO<sub>2</sub> par an. En interdisant cette pratique, **on peut ainsi éviter pour le périmètre des vols couverts par la DGAC entre 0,07 et 0,14 MtCO<sub>2</sub> pour l'année 2018, hors secteur amont**. On retiendra la fourchette basse pour être conservatif.

En projetant ce gain de 0.3% par an par rapport au scénario de référence (cf. § 7.1), nous pouvons estimer un gain de 3.7 MtCO<sub>2</sub> sur la période 2018-2050 pour cette mesure.

#### Externalités engendrées

**L'impact sur l'emploi est extrêmement faible** : la mesure ne provoque qu'un très léger inconvénient, quand des trajets concernés peuvent être effectués également via un transporteur situé hors de France. Mais Air France est généralement sans concurrence significative, sur les routes long-courrier concernées. En outre, dans certains cas (trajets intercontinentaux au départ de villes de province françaises), les transporteurs étrangers seront en moyenne plus fortement touchés qu'Air France par l'obligation.

Air France serait pénalisée d'une somme estimée entre 10 et 20 M€ par an sans réglementation globale des prix des aéroports.

#### Proposition de gestion des externalités

Le caractère irresponsable du double emport est si évident qu'une interdiction initiée par un pays se répandra vraisemblablement rapidement à d'autres.

<sup>216</sup> <https://www.eurocontrol.int/publication/fuel-tankering-european-skies-economic-benefits-and-environmental-impact>

<sup>217</sup> Retour pilotes de différentes compagnies.

<sup>218</sup> <https://www.strategie.gouv.fr/publications/de-l'action-climat>

## 7.2.1.4 Réduire le Cost-Index des vols à 0

## Axe n°4 : Réduction du Cost Index des vols à 0

## Acteurs concernés

Compagnies aériennes

## Éléments de contexte

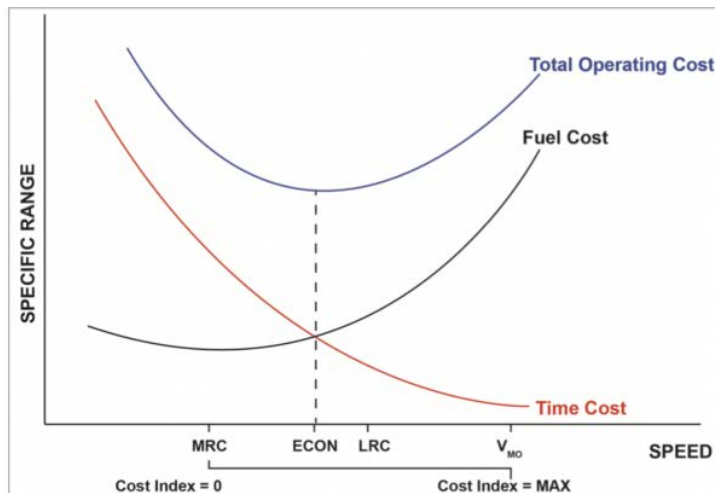
Le marché de l'aviation est un marché très concurrentiel. **Les compagnies aériennes recherchent la réduction de leurs coûts d'exploitation.** Le coût d'une ligne dépend de plusieurs facteurs. On distingue notamment :

- Le coût du carburant (CC) en €/L ;
- Le coût du « temps » (CT) en €/h, qui recouvre par exemple les coûts horaires du personnel et de la maintenance mais aussi le coût supporté par la compagnie pour un retard (pénalités, correspondances, etc.).

Ces facteurs ne sont pas indépendants : la consommation de carburant augmente au-delà de la vitesse optimale pour laquelle l'avion est conçu alors que les dépenses de salaires et de maintenance sont directement proportionnelles au nombre d'heures de vol effectuées donc diminuent avec la vitesse. Diminuer la vitesse en dessous de la vitesse optimale est défavorable pour les deux aspects donc peu utilisé sauf pour répondre à des contraintes extérieures (trafic aérien, etc....)

Lors de la préparation des vols, les compagnies aériennes élaborent des plans de vols qui définissent notamment niveau de vol et vitesse. Ces deux valeurs, et donc la consommation en kérosène de l'appareil, sont définies par le choix d'un indicateur appelé Cost Index (CI).

Ce paramètre est notamment utilisé dans les systèmes de gestion de vol pour piloter le Mach de vol, afin de maximiser les gains pour la compagnie aérienne en privilégiant soit les économies de carburant (choix d'un CI faible) soit la réduction des charges (choix d'un CI élevé).



([https://mediawiki.ivao.aero/index.php?title=Cost\\_Index](https://mediawiki.ivao.aero/index.php?title=Cost_Index))

**Un CI de 0 correspond au cas pour lequel la trajectoire de l'avion est la plus optimisée en matière de consommation** de carburant et permet dans ce cas à l'avion d'atteindre son rayon d'action maximum. Lorsque CI=0 c'est le coût du carburant qui prime sur tout le reste, et plus le CI est élevé, moins le coût du carburant est considéré, la vitesse sera alors plus élevée et la consommation plus forte. Un CI ECON correspond à l'optimum en termes de coût d'exploitation.

Pour un avion donné, la compagnie aérienne définit la valeur de CI recommandée aux équipages sur la base des différents postes de coût et de sa stratégie. En 2019 (pré COVID) les CI recommandés amènent typiquement à voler très proche de la vitesse optimale pour une compagnie aérienne comme Air France, comme dans la majorité des compagnies aériennes.

Le gain attendu est donc en théorie faible, cependant le sujet Cost Index reste intéressant à considérer pour les raisons suivantes :

**Prix du fuel :**

**Le CI correspondant à un optimum économique pour la compagnie aérienne, cette variable peut évoluer en fonction du poids des différents postes de coûts** (fuel, coût horaires de maintenance, équipages, etc.). Par exemple, en cas de baisse du prix du carburant, la compagnie aérienne pourrait être tentée d'augmenter le CI pour minimiser le coût global d'opération au détriment des émissions de CO<sub>2</sub>. Le CI est donc typiquement à surveiller lors de la reprise post crise COVID où les prix du carburant sont relativement faibles.

**Contraintes liées au contrôle et trafic aériens**

**À l'approche des zones aéroportuaires, le contrôle aérien doit réguler le flux d'appareil afin d'éviter les engorgements.**

Cette régulation se fait en demandant aux différents avions d'accélérer ou de ralentir et donc à s'écarter de la vitesse optimale. L'impact, limité dans le temps, est négligeable sur un long-courrier ramené au temps de vol total, mais l'est moins sur un court-courrier qui passe la majorité du temps de vol proche des zones aéroportuaires. Cependant, à nombre de vols et d'avions fixé, la solution actuelle reste plus optimale que de laisser les avions arriver en masse près d'un aéroport ce qui les amènerait ensuite à se mettre en circuit d'attente et émettre donc davantage de CO<sub>2</sub>.

Une opportunité de réduire ces écarts de vitesse est donc de désengorger les zones aéroportuaires pour réduire les contraintes de trafic ce qui n'est possible qu'en réduisant le nombre de vols et donc en lien direct avec la mesure 13 Réduction du nombre de passagers. Dans les voies aériennes importantes, par exemple les North Atlantic Tracks (NAT), les avions sont contraints de voler à vitesses similaires, imposées par le contrôle aérien pour assurer leurs distances de séparation sur l'ensemble de la traversée. Les différents types d'avion ayant des vitesses optimales différentes (entre Mach 0.82 et 0.85), cette vitesse unique va donc amener à désoptimiser en moyenne la performance sur ces voies aériennes. Cette contrainte est déjà limitante aujourd'hui avec des avions de différentes générations, les avions plus récents volant plus vite. Mais la contrainte peut devenir d'autant plus pénalisante si les avions de prochaine génération volent encore à des vitesses différentes.

**Contraintes liées aux aléas d'opérations :**

**Le dernier cas de figure pour lequel les avions peuvent être amenés à voler à une vitesse éloignée de  $CI=0$  concerne la gestion des aléas des opérations.** Par exemple, un avion décollant avec 30 minutes de retard va devoir effectuer son vol à une vitesse plus élevée pour rattraper son retard et éviter de rater les vols de correspondance à l'arrivée. En cas de retard important à l'arrivée amenant à rater une correspondance, les passagers sont reportés sur un vol suivant si le taux de remplissage le permet, sinon sur un vol ultérieur avec des frais associés pour la compagnie aérienne (repas, hôtel, ...). Les temps de correspondance pourraient être augmentés, mais cela pourrait amener à une diminution du nombre de rotations d'un appareil en une journée, donc une perte de rentabilité pour la compagnie<sup>219</sup>.

Une interdépendance apparaît donc entre le risque d'augmentation de la vitesse de vol et :

- La durée des correspondances (paramètre géré par la compagnie)
- Le taux de remplissage des avions
- La fréquence des rotations

**Description détaillée**

La mesure consiste à :

- **Encourager les compagnies aériennes à suivre le Mach de vol par rapport au Mach optimum (en termes de consommation/émission  $CO_2$ )** de chaque avion et ce, sur l'ensemble de leur flotte. Ce monitoring peut être effectué par la compagnie aérienne elle-même, ou avec le support externe de l'avionneur ou d'un fournisseur de service utilisant des logiciels spécialisés.

- Sur la base de ce monitoring, adapter les opérations et les contraintes afin de viser une majorité des vols effectuée à une vitesse proche de  $CI=0$  (par exemple 90% des vols à une vitesse entraînant une augmentation de consommation/émission  $< 0.2\%$ ). Les leviers principaux d'optimisation des vitesses de vol et consommation/émissions sont :

- **Collaborer avec le contrôle aérien pour optimiser les conditions de vol sur les espaces contraints** pour éviter de désoptimiser les vitesses des différents avions.

- **Optimiser l'ensemble des opérations en trouvant l'optimum pour les différents paramètres  $CI$** , durée des correspondances, taux de remplissage pour minimiser l'impact  $CO_2$  global au niveau de la flotte (métrique = quantité moyenne de  $CO_2$  émise par passager par an).

**Impact  $CO_2$** 

Il est difficile de savoir précisément quel  $CI$  moyen est volé par les compagnies aériennes aujourd'hui, en particulier compte tenu des contraintes liées au trafic aérien et aux contraintes opérationnelles (Retard, correspondance, etc.). Nous avons donc fait l'hypothèse suivante, basée sur des avis de pilotes et contrôleurs aériens, pour représenter la situation actuelle :

- 10% des vols sont effectués à une vitesse entraînant une surconsommation de 1%, ce qui correspond à une survitesse limitée jusqu'à la vitesse LRC bien connue des pilotes.
- 5% des vols sont effectués à une vitesse proche de la vitesse maximum de l'avion pour rattraper des retards importants. Cette survitesse amène une surconsommation de l'ordre de 4%.<sup>220</sup>
- Le reste, 85% des vols, sont effectués à une vitesse proche de  $CI=0$ , avec une surconsommation proche de 0.

Avec ces hypothèses, la recommandation qui consiste à monitorer les vitesses de vol pour mieux les optimiser, apporterait un gain de 0,2% sur les émissions du trafic aérien de 22.6Mt  $CO_2$  en 2018 (périmètre DGAC), donc 0,05 Mt $CO_2$  par an.

Si l'ensemble des vols étaient effectués proche de  $CI=0$  (vision très optimiste), le gain serait de 0,3% donc 0,07 Mt $CO_2$  par an.

**En projetant un gain de 0,2% par an par rapport au scénario de référence (cf. § 7.1), nous pouvons estimer un gain de 3.0 Mt $CO_2$  sur la période 2018-2050 pour cette mesure.**

**Externalités engendrées**

Du fait des contraintes liées aux retards potentiels, la gestion de la vitesse de vol via le  $CI$  est étroitement liée à :

- La durée des correspondances (paramètre géré par la compagnie) qui doit être suffisamment étendue pour minimiser le besoin de devoir accélérer en cas de retard raisonnable.
- Le taux de remplissage des avions : ce taux de remplissage doit être augmenté pour réduire la quantité d'émission par passager, mais d'un autre côté, un taux de remplissage limité représente une opportunité pour

<sup>219</sup> Le chaînage des vols opérant depuis un aéroport avec couvre-feu (par exemple Orly) est un autre exemple de gabegie occasionnée par un retard. Même si la coordination CDM entre ADP/NAV et compagnies est plutôt fluide pour obtenir des dérogations au couvre-feu pour des vols dépassant de moins de 5 minutes, il y a de multiples exemples où certains vols de retour le soir sont dérotés sur CDG pour quelques minutes de dépassement seulement. La conséquence est catastrophique pour les passagers (qui sont ensuite transportés la nuit par bus de CDG à Orly) et pour l'environnement car l'avion fait un vol à vide (« empty leg ») au petit matin pour revenir sur la base d'Orly depuis CDG. C'est l'arroseeur arrosé : on refuse quelques minutes de dépassement du couvre-feu pour limiter les nuisances sonores auprès des riverains d'Orly mais on se paye un retour à vide pour 50 km de vol et le plein d'émissions... À date malheureusement, les associations de riverains ne sont pas encore prêtes à entendre cet argumentaire.

<sup>220</sup> Edwards, H, Dixon-Hardy, DW and Wadud, Z. Optimisation of Aircraft Cost Indices to Reduce Fuel Use. 94th Annual Meeting: Compendium of Papers. January 2015

replacer les passagers<sup>221</sup> si un autre vol rate sa correspondance, et apporte donc de la flexibilité opérationnelle pour éviter de devoir accélérer.

- La fréquence des rotations représente une opportunité de remplacement des passagers, de façon similaire au taux de remplissage.

L'ensemble de ces paramètres ne pouvant pas être optimisés séparément, l'objectif est bien de trouver le meilleur compromis en termes d'émission globale de CO<sub>2</sub>.

## Bilan d'efficacité des mesures court terme

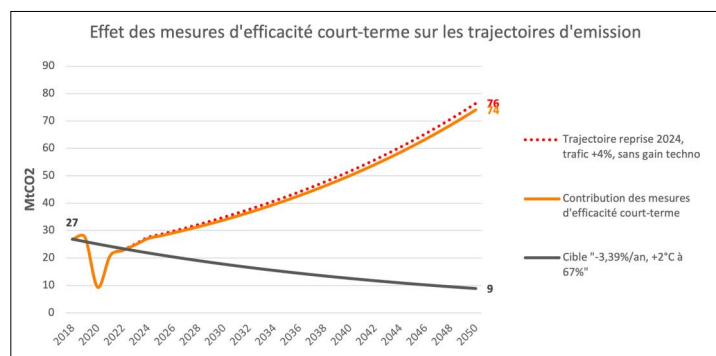


Figure 36 - Effet des mesures d'efficacité court terme sur les trajectoires d'émission - France

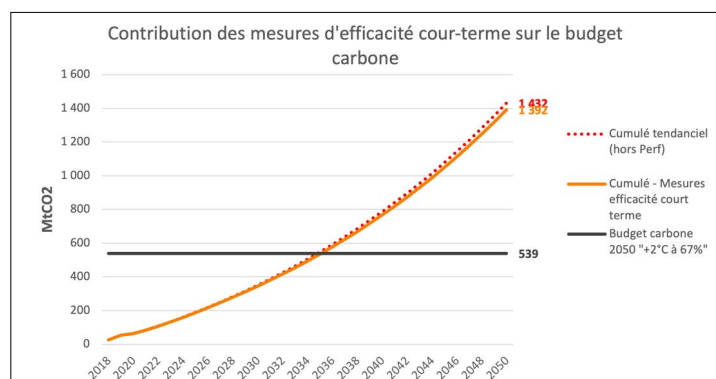


Figure 37 - Effet des mesures d'efficacité court terme sur les émissions cumulées - France

Les mesures d'efficacité court-terme apparaissent largement insuffisantes pour atteindre l'objectif ou pour « gagner du temps ». D'autres mesures court-terme sont possibles, elles relèvent de la sobriété des usages. C'est bien la combinaison de ces mesures court-terme qui permettent de contribuer significativement à l'objectif (cf. 7.3).

## 7.2.2 À moyen-long terme (à partir de 2025)

La portée de ces axes peut s'évaluer à l'échelle Monde ou France. Ils sont étudiés 1 fois ici et seront évalués 2 fois selon le périmètre étudié.

### 7.2.2.1 Optimisation des opérations en vol

#### Axe n°5 : Optimiser les opérations en vol

**Acteurs concernés**

Compagnies aériennes, régulateur

#### Éléments de contexte

L'**optimisation des routes et trajectoires** est un des leviers d'économies de carburant.

Des espoirs sont fondés sur l'initiative de « Ciel Unique Européen / Single European Sky (SES) », dont l'objectif principal est de s'affranchir des frontières entre pays, pour optimiser les flux de trafic. Toutefois, les projets qui dans ce cadre tentent d'améliorer le fonctionnement de plusieurs grands blocs d'espaces aériens<sup>222</sup> font face à de nombreuses limites. Par exemple, la modification des zones militaires demande de longues négociations, un fournisseur de service de contrôle aérien n'aura pas toujours intérêt à optimiser un flux, avant tout pour des raisons de sécurité, et aussi un projet trop transformateur pourra être abandonné s'il n'obtient pas l'adhésion des agents. Ainsi, de nombreux projets tendant à une optimisation du réseau aérien à l'échelle européenne prennent beaucoup de retard, voire sont abandonnés.

Le projet SESAR (Single European Sky ATM Research) coordonne les activités de recherche et développement liées à l'ATM pour l'Union Européenne. Le projet vise à développer le futur système de gestion du trafic aérien européen et donc contribue au Single European Sky (SES). Les objectifs du projet sont en particulier d'apporter des solutions en termes de sécurité, d'efficacité des opérations et d'optimiser l'impact environnemental. Sur ce dernier aspect, l'ambition des projets SESAR et SES est de réduire de 10%<sup>223</sup> les émissions de CO<sub>2</sub>.

En parallèle du projet SESAR, les états membres de l'OACI mettent en place progressivement les paquets de mesures issues du rapport environnement de l'OACI. C'est le projet "green aviation", décliné en blocs de mesures ATM et systèmes, les ASBU.

#### Description détaillée

##### Optimiser les routes et les trajectoires

Un certain nombre de solutions sont envisagées pour atteindre cet objectif, par exemple :

- Opérations avec descente continue ;
- Gestion des trajectoires 4D (3D géographique + paramètre temps), afin de minimiser les dé-optimisations de trajectoire (ex : temps d'attente à l'arrivée) ;

<sup>221</sup> Même si ce n'est pas une logique classique du yield management qui vise au contraire le surbooking. Le calibrage des algorithmes ne se fait pas sur la base des retards potentiels des autres vols sur un même réseau.

<sup>222</sup> Le plus important est le FABEC, un volume centré sur la France et l'Allemagne.

<sup>223</sup> [https://ec.europa.eu/research/press/jti/factsheet\\_sesar-web.pdf](https://ec.europa.eu/research/press/jti/factsheet_sesar-web.pdf)

- Free route pour réduire les contraintes de trafic amenant à voler sur une trajectoire plus longue que strictement nécessaire
- XMAN, séquençage consistant à réduire la vitesse des avions très en amont d'un aéroport à fort trafic pour éviter d'effectuer une attente.

Le développement de ces initiatives est forcément positif pour réduire les émissions, et elles doivent être supportées, mais le gain global de l'ensemble des solutions est, à ce jour, difficile à évaluer précisément par rapport à l'ambition de 10% de réduction des émissions.

L'indicateur « horizontal flight efficiency – KEA », qui mesure l'écart entre la trajectoire réelle d'un vol et sa trajectoire idéale, ne diminue plus significativement<sup>224</sup>, et les ambitions (réalistes) affichées par Eurocontrol montrent qu'il sera difficile de faire beaucoup mieux dans les années à venir. Le rapport OACI "2019 Environmental Report - AVIATION AND ENVIRONMENT"<sup>225</sup> explique également que l'efficacité des trajectoires opérationnelles est déjà de l'ordre de 96% aujourd'hui sur la zone Europe laissant donc un potentiel d'amélioration limité. Plusieurs raisons expliquent cela : les trajectoires réelles des avions sont globalement déjà optimisées ; la saturation des grands aéroports nécessite souvent de modifier en l'air et en amont les trajectoires des vols afin d'optimiser le flux d'arrivée à la piste ; les conflits (Ukraine, Syrie...) obligent les vols à contourner des espaces aériens fermés ; les régulations de trafic (en cas de mauvaises conditions météo, de grèves, par exemple) qui génèrent du retard, incitent les compagnies à planifier de nouveaux plans de vols ne traversant pas les secteurs de contrôle impactés, quitte à rallonger la durée de vol ; etc. La croissance soutenue du trafic oblige ainsi à trouver des solutions toujours plus complexes à déployer à grande échelle dans un espace aérien de plus en plus dense.

Sur la base du rapport OACI "2019 Environmental Report - AVIATION AND ENVIRONMENT" (cf. extrait ci-dessous), l'estimation des gains liés aux optimisations de l'ATM et des trajectoires sont plutôt de l'ordre de grandeur de 3% pour la zone Europe.

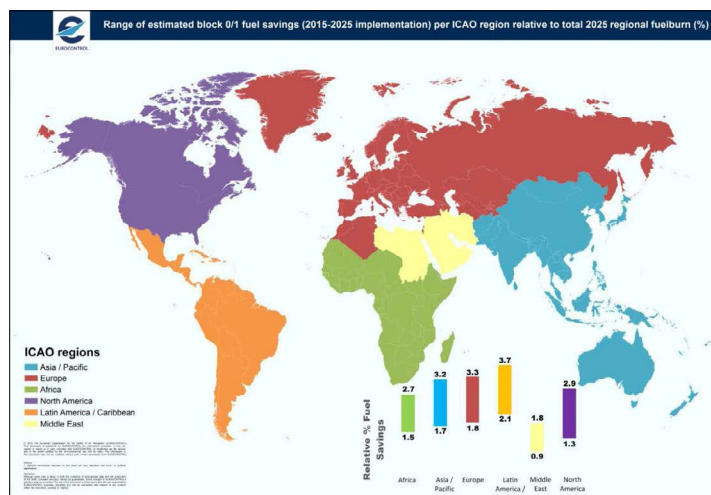


Figure 38 - Répartition géographique des espérances de gain de consommation (OACI)

L'optimisation des routes est donc possible mais difficile, et pour un gain encore difficile à démontrer. Toutefois, une modération du trafic et une plus forte volonté des États permettraient de stabiliser la charge du réseau aérien, d'accroître la prédictibilité du trafic et de tendre vers une utilisation plus optimale de l'espace aérien européen. Cette vision du futur du contrôle aérien est d'ailleurs celle défendue au sein de la DGAC par le Syndicat National des Ingénieurs et Cadres de l'Aviation Civile (SNICAC).

L'exploitation des données de vol et l'utilisation de logiciels type Openairline / Skybreathe est aussi l'une des pistes de SESAR pour l'optimisation des trajectoires. Ce point n'est pas étudié en détail ici, mais nous notons que la promesse commerciale est de réduire de 2 à 5% la consommation de carburant.

### Vol en formation

Airbus étudie également la possibilité de vol en formation<sup>226</sup>. Il permettrait à deux avions long-courriers de réduire légèrement leur consommation en se positionnant à la manière des oiseaux migrateurs. L'économie annoncée serait de 5% à 10%, pour l'avion suiveur, soit 2.5% à 5% pour les deux avions considérés ensemble. Mettre en place le vol en formation est associé à des challenges importants en termes de sécurité des vols, contrôle aérien et modèle économique pour les compagnies, mais ce point n'est pas détaillé ici.

### Réduire les traînées de condensation

Des études exploratoires s'intéressent à la possibilité de **modifier les plans de vol, pour réduire la formation de traînées de condensation**, tout en limitant l'augmentation concomitante de consommation de carburant<sup>227</sup>. L'idée est de faire voler les avions à une altitude légèrement différente, à laquelle le taux d'humidité ne serait pas propice à la formation des traînées. Conscients que les routes aériennes sont choisies pour optimiser le temps de vol (donc la consommation de kérosène et le coût du vol) et que les compagnies sont

224 <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2019-07/en-nip-airac-1905.pdf>, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1361920917309987>, ou <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.est.9b05608>

225 <https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/envrep2019.aspx#:~:text=The%20ICAO%20Environmental%20Report%202019,industry%20and%20the%20many%20other>

226 <https://www.airbus.com/newsroom/press-releases/en/2019/11/airbus-inspired-by-nature-to-boost-aircraft-environmental-performance.html>  
227 Voir par exemple <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1361920917309987> ou <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.est.9b05608>

souvent réticentes à modifier le parcours de leurs avions, les scientifiques estiment que moins de 2% des vols, à l'origine des traînées les plus persistantes, pourraient être déviés de  $\pm 2000$  pieds pour limiter de près de 60% l'effet des traînées de condensation du secteur. Ces déviations n'entraîneraient selon eux qu'une surconsommation de 0,014% de carburant et donc un large bénéfice au total<sup>228</sup>.

À ce stade, nous ne disposons malheureusement que trop peu d'études de ce type, exploitant des données très localisées (espace aérien du Japon notamment) et dont les gains potentiels résultent de simulations qui demanderaient une confirmation expérimentale. En outre, beaucoup de questions sur l'applicabilité opérationnelle subsistent : est-il possible, avant le décollage, d'identifier les 2% des vols concernés et de déterminer la bonne altitude à laquelle voler ? Les compagnies aériennes et/ou les autorités du contrôle aérien accepteraient-elles de dévier certains des vols uniquement par souci écologique ? Cela apporterait une contrainte de plus et un niveau de complexité encore supérieur au contrôle, exercice déjà compliqué du fait de la densité du trafic.

Nous retenons que cette proposition est prometteuse, mais elle nécessite des études complémentaires et une meilleure compréhension des phénomènes physico-chimiques responsables des nuages d'altitude. Enfin, notons que son applicabilité dans une stratégie de décarbonation n'est possible que si l'on considère l'ensemble du forçage radiatif (effet du CO<sub>2</sub> et hors CO<sub>2</sub>) dans le périmètre des émissions à faire décroître.

## Impact CO<sub>2</sub>

Il est difficile de modéliser avec précision les gains en émission de CO<sub>2</sub> à moyen et long terme pour cet axe. Nous procédons donc à une estimation sur la base des études existantes et des pistes d'études.

Les pistes d'optimisation :

- L'optimisation ATM et trajectoire (vertical et horizontal) : 3% de potentiel maximum d'après l'OACI ;
- Autres technologies innovantes : Le vol en formation. Il représenterait donc 2,5 à 5% par Long-Courrier. Les long-courriers étant responsable de 56,6% des émissions sur le périmètre France dans estimation, nous pourrions imaginer une réduction de 1,4% à 2,8% si cette pratique était généralisée.

**Nous envisageons donc un gain de 4 à 6% pour les opérations en vol à horizon 2050.**

Si nous y ajoutons les gains des axes court-terme « Décarbonation des opérations au sol » (2,4%) et « Réduction du Cost Index » (0,25%), nous arrivons à un gain total concernant les opérations pouvant aller de 6% à 9%.

L'objectif SESAR étant de 10%, nous faisons le choix de

prendre l'hypothèse, que nous jugeons très optimiste, de 10% de gain à horizon 2050 sur l'ensemble des opérations, soit 7,35% pour les opérations en vol sur le moyen-long terme. Ce chiffre est donc une estimation permettant d'arriver à l'ordre de grandeur de 10% sur l'ensemble des opérations, il n'est pas issu d'une étude détaillée basée sur le choix et le déploiement de solutions précises.

### 7.2.2.2 Innovation technologique et roadmap avion 2025-2050

#### Axe 6 : Mettre l'innovation technologique au service des enjeux et des contraintes amenés par le changement climatique

##### Acteurs concernés

Acteurs de l'industrie aéronautique, Pouvoirs publics

##### Éléments de contexte

La **mise en œuvre de nouveaux et ambitieux programmes de développement aéronautique**, orientée résolument vers les enjeux et les contraintes amenés par le changement climatique, représente une opportunité pour redynamiser l'innovation qui a toujours prévalu dans le domaine aéronautique, et pour renouer avec la tendance à l'amélioration énergétique des avions, en cours d'essoufflement.

Des programmes d'une telle ampleur ont naturellement ponctué l'histoire de l'aéronautique : le programme Concorde ou le programme A380 sont de bons exemples et démontrent que leur développement est accessible pourvu que l'impulsion politique initiale et l'ambition soient à la hauteur. Ils démontrent aussi, et malheureusement, que l'adaptation au besoin de mobilité dans un contexte mondial donné (prix de l'énergie, croissance, ...) est un enjeu industriel et commercial de premier ordre.

On peut considérer que 10 ans sont nécessaires pour développer un nouveau programme, hors temps de R&T à réaliser en amont, certifier les avions et sortir les premiers modèles des chaînes d'assemblage.

**Le défi est immense, et les futurs avions devront répondre aux contraintes et enjeux suivants :**

- **La diminution de l'impact climatique total par passager.km** : réduction de la consommation de carburant (efficacité énergétique) et réduction des effets hors-CO<sub>2</sub> (cf. 5.7.2), compatibilité maximale avec les énergies alternatives au kérosène (cf.7.2.2.3) et amélioration radicale de l'efficacité énergétique des appareils par rapport à la génération de turboréacteurs commerciaux la plus récente.

- **L'évolution du climat** : dans une atmosphère qui se réchauffe et dont l'humidité absolue augmente, toutes choses égales par ailleurs, la poussée des moteurs et la portance tendent à diminuer. De même la couche atmosphérique où le cisaillement est maximum (production de turbulence) tend à augmenter en altitude.

<sup>228</sup> Voir par exemple <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1361920917309987> ou <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.est.9b05608>

Il sera sans doute nécessaire d'anticiper cet effet pour définir l'altitude de vol et le Mach de croisière.

Le rôle de l'État et de ses partenaires européens est incontournable. Alors que l'industrie est sous le choc de la crise du COVID-19, le lancement d'un tel programme ne saurait voir le jour sans une forte impulsion politique ni sans une garantie publique, notamment en ce qui concerne les risques industriels associés. Le plan de soutien à l'aéronautique du gouvernement Français et le Green Deal Européen via son projet de recherche et développement Clean Sky donnent des signes encourageants d'une volonté politique de relever ce défi.

## Description détaillée

### Les pistes d'améliorations technologiques

Les améliorations de la performance énergétique et « climatique » reposent, du point de vue de la technologie, sur les pistes suivantes :



#### Moteurs

Les ingénieurs s'accordent pour constater que l'architecture des turboréacteurs les plus récents (LEAP de Safran et GE, soufflante à engrenages de Pratt & Whitney, etc.) atteint une asymptote technico-industrielle<sup>229</sup>, qui ne sera vraisemblablement dépassée qu'à long terme au prix d'importants efforts portés sur les architectures avion et moteur (nous détaillons certaines de ces solutions plus loin dans ce rapport). Au mieux quelques pourcents pourront être obtenus dans les années à venir<sup>230</sup>. D'ailleurs, quand bien même une amélioration de l'efficacité énergétique des turboréacteurs serait possible, elle ne déboucherait pas forcément sur une amélioration de leur impact climatique : une des voies d'amélioration est l'augmentation de l'efficacité thermique, mais a priori plus un moteur a une forte efficacité thermique, plus il produit de particules fines propices à la formation de traînées de condensation, et plus il est susceptible de rejeter des oxydes d'azote, responsables de la production d'ozone, gaz à effet de serre puissant. Cependant ces deux effets peuvent être atténués grâce à des améliorations technologiques sur la chambre de combustion, comme c'est le cas entre le moteur LEAP et le CFM56<sup>231</sup> du consortium CFM International, formé par Safran et General Electric.

Une autre voie d'optimisation est celle de l'amélioration de l'efficacité propulsive, avec la recherche de taux de dilution plus élevés, voire en revenant à des **turbopropulseurs** (moteurs à hélice), qui procureraient un fort gain en consommation de carburant. Les avions voleraient alors nettement moins vite et nettement plus bas, ce qui supprimerait la grande majorité des effets climatiques hors CO<sub>2</sub>. Les avions correspondant ont le mérite de déjà exister, du moins dans

une certaine plage de capacité<sup>232</sup>, et d'être largement français. Malheureusement, la vitesse réduite rend cette solution inenvisageable, dans les conditions économiques actuelles (sauf pour les vols courts), car elle induit des coûts supérieurs<sup>233</sup> aux économies de carburant. Cette proposition appliquée aux vols courts est étudiée et chiffrée dans le paragraphe 7.2.1.2. La technologie étant disponible, elle peut aussi en théorie être mise en œuvre rapidement.

La technologie **Open rotor**, co-développée par Safran, qui s'efforce de réunir les avantages du turbopropulseur et du turboréacteur en cumulant un fort rendement thermique et un fort rendement propulsif, **apporterait un gain de l'ordre de 15%**, sur les vols concernés. Mais sa mise en œuvre n'est pas assurée, en raison des difficultés inhérentes à une rupture technologique<sup>234</sup>. L'Open rotor ayant des incidences sur l'architecture de l'avion, il demandera un avion conçu spécifiquement pour l'accueillir. Il pourrait par ailleurs se heurter à la frilosité des compagnies aériennes, car il ferait évoluer d'une part les installations de maintenance, d'autre part la perception des passagers. Il convient également d'anticiper une certaine réticence des autorités de certification (EASA, FAA, etc.), essentiellement pour deux raisons :

- Contrairement aux turboréacteurs classiques, l'absence de carénage ne garantit pas la rétention d'une pale d'hélice qui serait éjectée.
- Il existe un risque important de régression sur les nuisances sonores subies par les riverains.<sup>235</sup>

Enfin, même si l'Open rotor était déployé au moyen-courrier, sa diffusion aux vols long-courriers apparaît légèrement plus difficile : cette technologie implique en effet une réduction de vitesse<sup>236</sup>, de l'ordre de -10%, et le coût de l'allongement des vols pourrait être considéré comme trop élevé au regard de l'économie de carburant dans un contexte où le prix du baril de pétrole est relativement faible.

232 <https://www.latribune.fr/entreprises-finance/industrie/aeronautique-defense/20120218trib000683764/atr-ou-l-incroyable-resurrection-d-un-constructeur-d-avions-a-helices.html>

233 Entre autres : coût horaire du personnel navigant, nombre de vols pouvant être réalisés par un appareil chaque jour. <https://www.latribune.fr/entreprises-finance/industrie/aeronautique-defense/aviation-sans-co2-oublions-l-avion-electrique-la-solution-est-ailleurs-dit-safran-834909.html>

234 Certes, Safran a testé sur mât, en 2017, un prototype. Mais une version précédente avait franchi cette étape en 1985, avant d'être testée en vol en 1986, puis de ne pas être déployée sur des avions commerciaux. Le risque associé au changement de technologie était considéré comme plus déterminant que les gains en consommation de carburant. Signe de l'incertitude sur le devenir de l'Open rotor, Safran est réduit, pour promouvoir son produit, à prendre le risque de rappeler quelques vérités désagréables mais de bon sens sur la perspective d'avions électriques : <https://www.latribune.fr/entreprises-finance/industrie/aeronautique-defense/aviation-sans-co2-oublions-l-avion-electrique-la-solution-est-ailleurs-dit-safran-834909.html>

235 Cf. [https://www.easa.europa.eu/eae/system/files/usr\\_uploaded/219473\\_EASA\\_EAER\\_2019\\_WEB\\_HI-RES\\_190311.pdf](https://www.easa.europa.eu/eae/system/files/usr_uploaded/219473_EASA_EAER_2019_WEB_HI-RES_190311.pdf), page 31.

236 Plus précisément : l'efficacité propulsive maximale de l'Open rotor est réalisée pour des vitesses comprises entre Mach 0,7 et 0,8 ; tandis que les vitesses de références actuelles sont Mach 0,78 pour le moyen-courrier, et Mach 0,85 pour le long-courrier. [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WG1AR5\\_SPM\\_brochure\\_fr.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WG1AR5_SPM_brochure_fr.pdf)

229 Voir ce [rapport](#) du NLR., le centre aérospatial néerlandais.

230 Notamment sur le long-courrier, si par exemple l'industrialisation de l'« UltraFan » de Rolls-Royce réussit. Il ne s'agit néanmoins pas de perspectives proches : au minimum une décennie d'industrialisation, puis une décennie de diffusion, avant que ces moteurs ne soient significativement répandus.

231 Cela se vérifie assez facilement dans la [base de données de l'OACI](#) : le LEAP émet moins de particules fines (baisse du "Smoke Number" SN) et de NOx que le CFM56, malgré un meilleur rendement thermique.

Les difficultés d'accepter les contreparties de vitesse, de perception utilisateur et de coût inhérentes aux turbopropulseurs existants ou à la technologie Open-Rotor montrent que mettre la technologie au service de la réduction de l'impact climatique prioritairement aux autres considérations n'est pas encore une évidence.



### Structure et masse

L'allègement des avions est une piste de progrès possible. La situation concernant cette piste est malheureusement sensiblement la même que pour les moteurs : l'approfondissement des gains déjà obtenus est de plus en plus difficile. En effet, la recherche de gains de masse est déjà un facteur d'optimisation dans la conception des avions pour limiter la consommation de carburant (intérêt économique pour les compagnies). Cette recherche de gain est à équilibrer avec les exigences de robustesse, de fiabilité et de sécurité mais le déblocage de certaines briques technologiques pourrait permettre d'aller plus loin. Une autre manière d'adresser cette problématique est de chercher à augmenter le nombre de passagers transportés par avion avec des leviers tels que la densification des cabines ou l'optimisation du taux de remplissage (cf. 7.3.2)



### Écoulement de l'air

Les perspectives de réduction de la traînée de frottement sont actuellement orientées vers la laminarité. Il s'agit de conserver autant que possible un écoulement laminaire de l'avion, et de retarder la transition vers un état turbulent de l'écoulement autour de l'avion. En effet, un écoulement laminaire génère une traînée de frottement environ 90% plus faible qu'un écoulement turbulent.

On distingue généralement la laminarité naturelle (Natural Laminar Flow, NLF) de la laminarité contrôlée, par des systèmes passifs ou actifs (Laminar Flow Control, LFC)<sup>237</sup>. Ces technologies ont aujourd'hui des applications par exemple sur le Boeing 787, qui dispose de nacelles dites à laminarité naturelle et d'un empennage vertical doté d'un système hybride, ainsi que sur certains jets privés.

Le gain de consommation estimé de l'application de la laminarité naturelle aux ailes pour un futur avion court-moyen-courrier est estimé à 4-5%. Ce concept impose de réduire le Mach de croisière, autour de 0,75<sup>238</sup>, car la flèche de l'aile (son angulation vers l'arrière) doit être réduite, pour diminuer les effets tridimensionnels déstabilisant l'écoulement<sup>239</sup>. Ainsi, pour une application long-courrier, ce concept impliquerait de réduire substantiellement la vitesse de croisière, à l'instar de l'Open Rotor.

Les concepts de type Hybrid Laminar Flow Control (HLFC) ou Laminar Flow Control (LFC) sont quant à eux de niveau de maturité nettement plus faible.

237 Cf. Overview of Laminar Flow, NASA-TP/19980232017 et Review of hybrid laminar flow control systems, K.S.G. Krishnan, O. Bertram, O. Seibel.

238 Comme sur le démonstrateur « Blade », dans le cadre du programme de recherche européen Clean Sky : <https://www.cleansky.eu/news/clean-sky-blade-laminar-flow-demonstrator-makes-first-flight>.

239 <https://www.aerospacetestinginternational.com/videos/airbus-tests-laminar-flow-wing.html>



### Nouvelles architectures

Des architectures nouvelles sont régulièrement mises en avant, notamment l'aile volante. Celle-ci pourrait potentiellement fournir des gains de consommation significatifs, qui restent à chiffrer. Il s'agit néanmoins de perspectives de long terme, induisant des ruptures fortes dans tous les domaines<sup>240</sup>, et ne répondant donc pas à la nécessité de maîtriser les émissions de l'aviation dans les quelques décennies à venir.



### Avions en rupture sur les énergies alternatives : Hybridation électrique

L'hybridation électrique de moteurs thermiques est identifiée par le secteur comme une opportunité majeure pour réduire les émissions de CO<sub>2</sub> des avions. Cependant, ces gains ne pourront être atteints dans un 1er temps que pour des avions de relativement petite taille dans l'aviation générale, l'aviation d'affaires et le transport régional. En outre, la problématique du poids est cruciale dans l'aéronautique, et le gain d'émission obtenu par hybridation est à mettre en balance du surpoids (donc de la surconsommation) induit par l'emport d'un moteur supplémentaire.

Plusieurs architectures sont possibles pour une puissance électrique distribuée : turbine à gaz avec hybridation électrique (partielle ou complète / en série ou en parallèle), turbo électrique (partiel ou complet), voire, à terme, moteur 100 % électrique.

Différents niveaux d'hybridation et différentes sources d'énergie primaire (ex-turbine à gaz et potentiellement pile à combustible) devront être testés. En parallèle, les technologies d'intégration dans les cellules d'avions devront être développées et rendues certifiables.

Ces applications pourront permettre de développer et valider des technologies qui seront applicables ensuite pour les courts et moyens courriers, puis à terme les longs courriers avec les capacités de génération, transmission et stockage de puissances électriques croissantes.

Toutefois, la demande croissante de terres rares nécessaires à la production des moteurs électriques et des batteries pour l'aéronautique entrera en compétition avec l'automobile qui voit également sa stratégie de décarbonation passer par l'hybridation et l'électrique. De plus, la problématique du poids étant cruciale, la technologie d'hybridation (avec donc 2 moteurs au lieu d'un) pourrait atteindre une limite d'efficacité conduisant à un autre choix technologique pour les courts à longs courriers.



### Avions en rupture sur les énergies alternatives : Hydrogène

Avant qu'Airbus ne rende public l'avant-projet « ZEROe »<sup>241</sup> en septembre 2020, ayant pour objectif la mise en service d'un court-moyen-courrier et/ou d'un avion régional à propulsion Hydrogène en 2035, le secteur était plutôt prudent sur cette technologie. En effet si l'hydrogène (ou, plus précisément, le dihydrogène dit H<sub>2</sub>) est couramment utilisé dans le domaine

240 Jusqu'à l'aménagement des aéroports, pour de tels avions à grande envergure.

241 <https://www.airbus.com/innovation/zero-emission/hydrogen/zeroe.html>

spatial et s'il présente l'énorme avantage de ne produire que de l'eau lors de sa combustion en présence d'oxygène, l'utiliser comme carburant d'un vol commercial dans un objectif de décarbonation est un défi à la fois passionnant, mais aussi majeur à plusieurs dimensions :

- Construire un « Avion à hydrogène », c'est construire un avion réellement nouveau, en rupture technologique avec ses prédécesseurs, devant embarquer des équipements nouveaux (stockage, refroidisseurs), de nouveaux moteurs, nécessitant une nouvelle architecture avion. C'est donc un projet industriel de grande ampleur, avec son lot de risques.
- L'hydrogène n'est pas un gaz naturel, il faut le synthétiser. Aujourd'hui, la quasi-totalité de l'hydrogène produit dans le monde, pour des procédés industriels, notamment dans les raffineries, l'est par vaporeformage d'hydrocarbures<sup>242</sup>, émetteur de CO<sub>2</sub>. Le bilan émissif total d'un avion propulsé avec de l'hydrogène produit ainsi ne serait pas meilleur, voire pire, qu'un turboréacteur actuel. Il est donc nécessaire de recourir à un procédé de synthèse bas carbone (comme l'électrolyse ou la CSC<sup>243</sup>) lui-même alimenté par de l'électricité bas carbone. Ce procédé doit être industrialisé et mis à l'échelle des besoins de l'industrie, nécessitant ainsi un effort dédié conséquent et synchronisé avec la roadmap aéronautique de la filière énergétique et générant des externalités de production et des risques d'approvisionnement à maîtriser (voir Externalités et point détaillé en 7.2.2.3).
- Les infrastructures aéroportuaires doivent être adaptées dès sa mise en service, et ce dans une collaboration internationale synchronisée devant permettre au nouvel avion d'assurer des vols internationaux.
- En particulier, le stockage dans les aéroports et à bord des avions pose un défi de volume tout à fait nouveau. En particulier, pour une même énergie délivrée, l'hydrogène liquéfié occupe au mieux 3 fois plus de place que le kérosène.
- 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 (réaction d'ailleurs recherchée pour la propulsion). La disposition des réservoirs est donc cruciale. Contrairement au kérosène, il ne devrait pas être stocké dans les ailes, mais dans des citernes à l'intérieur de l'avion. En cela il serait plus protégé en cas de crash, de détachement d'un fan. La petite taille de sa molécule (H<sub>2</sub>) le rend fuyant et nécessite de revoir l'étanchéité des circuits. Embarquer de l'hydrogène dans les avions implique de nouvelles contraintes pour respecter les niveaux de sécurité requis dans l'industrie aéronautique, et présente un enjeu de certification important, bien qu'a priori tout à fait maîtrisable par l'industrie.

- Si les effets « hors CO<sub>2</sub> » liés à la combustion du kérosène à haute altitude ne sont pas encore totalement maîtrisés (cf. 5.7.2), ils le sont encore moins dans le cas de la combustion de l'hydrogène à l'intérieur d'un réacteur d'avion, qui émet par nature bien plus de vapeur d'eau. Ils sont annoncés inférieurs (la combustion étant plus « propre » que pour le kérosène), mais il sera nécessaire d'analyser l'ensemble des émissions pour évaluer sa contribution totale au FR (CO<sub>2</sub>, NOx produits avec l'azote de l'air, particules, autres).

Le défi de l'avion à hydrogène réside moins en sa réalisation technique pure, que dans l'atteinte d'un « range » (rayon d'action) suffisant lui permettant de remplacer au maximum la flotte existante (Régional, Court-Courrier, Moyen-Courrier?), la gestion de la chaîne d'approvisionnement en hydrogène bas carbone ou la mise à niveau synchronisée des infrastructures aéroportuaires. Bien sûr il faudra aussi qu'il trouve son marché, en particulier si un nouvel avion à kérosène vient le concurrencer, bien moins risqué à court terme pour une compagnie. Il porte ainsi avec lui à la fois une vraie opportunité, mais aussi un vrai risque industriel à plusieurs dimensions, donc un risque important pour la trajectoire des émissions qui doit baisser rapidement.

#### • Quelle roadmap avion d'ici 2050 ?

**Les futurs programmes avion répondant aux enjeux et aux contraintes climatiques devront ainsi combiner ces différentes pistes technologiques** en s'adaptant aux besoins de mobilité et aux modifications atmosphériques induites par le changement climatique. La décarbonation de l'aviation ne pourra s'effectuer pour toute la gamme en même temps : l'évolution des réglementations des autorités de certification devra s'adapter aux nouvelles énergies à bord (comme l'hydrogène, les carburants de synthèse ou les batteries), à la gestion de l'énergie à bord (haute tension, courants forts), et aux nouveaux ensembles propulsifs (open rotor, turboréacteur à fort taux de dilution par exemple).

La roadmap 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 précise : "Les technologies Aviation Propre à faible émission permettront des gains d'efficacité énergétique de 30 à 50 % en 2050, comparativement à la flotte actuelle. De plus, ce partenariat permettra à l'avion, les moteurs et les équipements d'utiliser tout le potentiel des carburants faiblement carbonés voire décarbonés, dont, potentiellement, des innovations en rupture telles que l'hydrogène. Ces améliorations accéléreront la transition vers la neutralité carbone."

**La construction d'une roadmap avion, c'est-à-dire d'un calendrier de mise en service de nouveaux appareils présentant des technologies, capacités et des niveaux de performance donnés, répondant à des besoins de mobilité précis, doit ainsi se faire par catégorie d'appareils.**

**2 types d'appareils "en rupture" ressortent des analyses d'experts** et sont mis en perspective pour une entrée en service en 2030-2035 dans la roadmap consolidée dans les

242 <https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/enjeux-et-prospective/decryptages/energies-renouvelables/tout-savoir-lhydrogene>

243 Capture et séquestration du carbone.

projets européens Horizon 2020 / CleanSky (voir SRIA The proposed European Partnership for Clean Aviation) et également par Airbus (Présentation des concepts zéro émission le 21 septembre 2020):

- **Avion de transport régional** (entre 20 et 80 passagers, rayon d'action entre 500 km et 1000 km), avec une infrastructure ultra optimisée pour intégrer une/des turbine(s) à gaz (turbopropulseur) "100% drop-in fuels" ou à injection d'hydrogène, hybridée(s) électriquement, permettant une réduction de 50% à l'horizon 2035 de la consommation de carburant par rapport aux avions 2020 équivalents et respectant les limites OACI d'émissions sonores.

- **Avion court-moyen-courrier** (short and medium-range aircraft: SMR, ou **CMC**, entre 80 et 250 passagers, rayon d'action entre 1000 et 7000 km) ultra-efficace (ex. laminarité naturelle ...), intégrant des technologies en rupture (ex. réacteur à fort taux de dilution), capable de carburants alternatifs (SAF) et/ou dihydrogène, permettant une réduction de 30% à l'horizon 2035 de la consommation de carburant par rapport aux avions 2020 équivalents.

**2 autres types d'appareils pourraient également profiter des innovations technologiques** développées pour l'avion régional ou les courts/moyens courriers précédents:

- **Avion long-courrier (LC**, plus de 250 passagers et rayon d'action supérieur à 7000 km) intégrant les améliorations aérodynamiques et de réduction de masse à des taux d'incorporation de carburants alternatifs (SAF) « drop-in » permettant une réduction de 30% à l'horizon 2035 de la consommation de carburant par rapport aux avions 2020 équivalents.

- **Avion très court courrier (Commuter**, moins de 19 passagers et rayon d'action inférieur à 500 km), hybride électrique, à batterie ou pile à combustible, qui dès 2030 pourrait voler sans propulsion thermique. Les avions très court-courrier ne joueront qu'un rôle minime dans la réduction de l'impact climatique dans la mesure où cette catégorie d'aéronefs représente une faible part du trafic, toutefois les commuturs serviront de plate-forme de développement et permettront aux industriels de gagner en expérience et de valider les nouvelles technologies utilisées (CleanSky 2 Hydrogen Powered Aviation, Clean Aviation SRIA).

Sur cette base, nous avons construit une roadmap avion, nommée « **INDUS** », calée sur le calendrier annoncé par l'industrie, dans les hypothèses les plus optimistes.

**Tableau 5 - Roadmap Avion optimiste «INDUS» (ci-dessous)**

(1) La performance énergétique correspond au pourcentage d'énergie nécessaire, en comparaison avec le meilleur avion existant en 2018, quel que soit le carburant utilisé, pour effectuer une même mission

(2) Le taux d'incorporation de SAF représente ici la quantité maximum de biocarburant ou PTL que l'avion peut embarquer pour fournir 100% de l'énergie requise

(3) En 2018, les flottes ne sont pas entièrement renouvelées avec les dernières générations d'avion disponibles, nous les intégrons donc dans notre modèle de calcul

(4) La performance énergétique intègre ici la réduction des émissions liée à l'utilisation de l'électricité en propulsion. La performance avion réelle est inférieure. Ici uniquement (pour des questions de modélisation), la performance énergétique est confondue avec la performance émissive et les calculs d'émissions liés à la production d'électricité nécessaire dans ce cas ont été négligés au vu des volumes.

(5) Le gain énergétique nominal cible de 25% d'une génération d'avion à l'autre est ramené à 15% pour le passage à l'hydrogène du fait de la masse supplémentaire des équipements embarqués et du volume nécessaire de l'H<sub>2</sub>

(6) L'hypothèse d'un long-courrier à propulsion Hydrogène semble très peu réaliste à ce jour. En effet, si elle semble techniquement réalisable, la faible densité énergétique volumique de l'hydrogène conduirait à devoir emporter un volume de carburant trop important pour un long-courrier. La piste principale considérée pour décarboner les trajets long-courrier concerne l'utilisation de SAF.

| Année               | Type     | Caractéristiques                                                                                                   | Performance énergétique <sup>(1)</sup> | Taux Incorp. SAF <sup>(2)</sup> | Taux Incorp. H <sub>2</sub> | Référence                                         |
|---------------------|----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------------------|
| 2018 <sup>(3)</sup> | CMC      | Dernières générations de Turboréacteurs                                                                            | 80%                                    | 50%                             | 0%                          | A3XX NEO, B737 Max                                |
|                     | LC       | Dernières générations de Turboréacteurs                                                                            | 75%                                    | 50%                             | 0%                          | A350, B787                                        |
| 2025                | Commuter | Propulsion hybride électrique / carburant liquide (hors H <sub>2</sub> )                                           | 50% <sup>(4)</sup>                     | 25%                             | 0%                          | SRIA Clean Aviation (optimiste).                  |
|                     | Régional | Turbopropulseur nouvelle génération                                                                                | 90%                                    | 50%                             | 0%                          | Hypothèse                                         |
| 2027                | CMC      | Turboréacteur nouvelle génération                                                                                  | 75%                                    | 50%                             | 0%                          | Hypothèse (Avion type Boeing NMA/MoM)             |
| 2030                | Commuter | Propulsion Hydrogène                                                                                               | 85% (-15%) <sup>(5)</sup>              | 0%                              | 100%                        | Hypothèse                                         |
|                     | Régional | Propulsion hybride électrique / carburant liquide (hors H <sub>2</sub> )                                           | 50% <sup>(4)</sup>                     | 25%                             | 0%                          | SRIA Clean Aviation                               |
| 2035                | Régional | Configuration ultra efficace, Propulsion Hydrogène                                                                 | 85% (-15%) <sup>(5)</sup>              | 0%                              | 100%                        | SRIA Clean Aviation (optimiste) et Airbus (ZEROe) |
|                     | CMC      | Configuration ultra efficace, turbine à gaz fort taux de dilution, propulsion H <sub>2</sub> , dihydrogène liquide | 63,8% (-15%) <sup>(5)</sup>            | 0%                              | 100%                        | SRIA Clean Aviation (optimiste) et Airbus (ZEROe) |
|                     | LC       | Configuration ultra efficace, turbine à gaz utilisant du carburant SAF, (APU) hybride <sup>(6)</sup>               | 56,3% (-25%)                           | 100%                            | 0%                          | SRIA Clean Aviation (optimiste)                   |

Dans la suite, nous regarderons également les impacts d'une roadmap « **INDUS+5** » prenant l'hypothèse plus prudente d'un décalage de 5 ans de la date de mise en service de ces appareils.

### • Répondre à ces objectifs ambitieux implique également de :

- Penser techniquement et commercialement ces programmes, dès le début selon des principes d'éco-conception, tels que :
  - Maîtriser les émissions hors CO<sub>2</sub> afin de ne pas dégrader les bénéfices énergétiques et carburants ;
  - Faciliter le recyclage en fin de vie.
- Pratiquer la co-conception sur l'ensemble du cycle de vie en réunissant dès la phase d'avant-projet motoristes et avionneurs (amélioration de l'intégration motrice) ;
- Pratiquer la co-conception avec les compagnies aériennes afin de préparer le public à des formes d'avion potentiellement différentes des formes traditionnelles ;
- Recourir à des technologies ou connaissances nouvelles (par ex. surfaces portantes et non portantes laminaires ; plus grand allongement des ailes afin de réduire la traînée induite ; Mach de vol optimal potentiellement inférieur à celui des formes actuelles ; maîtrise du bruit lors des phases de décollage et d'atterrissage) ;
- Considérer des technologies jusqu'ici laissées de côté pour des raisons économiques (ex. Open Rotor) ou adapter des technologies existantes (ex. turbopropulseur) ;
- Diminuer le coût carbone des opérations et manœuvres au sol, par exemple intégrer dès la conception un moteur électrique dans le train avant pour assurer un taxi autonome, qui pourrait également récupérer de l'énergie à l'atterrissage ;
- Encourager les compagnies aériennes (par des dispositifs réglementaires et la détermination d'objectifs clairs et ambitieux, par des systèmes de bonus/malus sur les redevances, etc.) à renouveler rapidement leur flotte en privilégiant ces nouveaux appareils plus économes.
- Assurer la disponibilité suffisante d'énergie alternative (SAF, PTL, H<sub>2</sub>) produite via des processus industriels bas carbone, dès la mise en service des avions. Actuellement, les nouveaux avions sont certifiés pour un taux d'incorporation de 50% de SAF, mais la disponibilité de ces derniers est largement insuffisante pour atteindre ces niveaux.
- Assurer la disponibilité des infrastructures aéroportuaires spécifiques pour l'Hydrogène (Approvisionnement, Stockage, processus et outil de remplissage des réservoirs avion).
- Assurer un niveau de collaboration internationale et une synchronicité de la mise à disposition des carburants et des infrastructures aéroportuaires suffisants. Elle doit permettre aux nouveaux avions d'assurer les liaisons in-

ternationales sans recourir au « Fuel tankering », option qui sera de toute façon exclue pour l'hydrogène au vu de la problématique de volume embarqué.

### Remarques :

*Le développement de ces appareils permettra d'atteindre les objectifs de réduction de consommation d'énergie pour la période 2020-2050 (sur une base de renouvellement des flottes de 15 ans). Il est nécessaire de poursuivre en parallèle un programme de développement aéronautique pour concevoir les véhicules adaptés aux conditions de voyage de 2045. Cette roadmap étant jugée très optimiste, et n'ayant pas d'information particulière à date, n'avons pas pris en compte de nouvelle génération d'avion pour 2040-2045. Dans tous les cas, au vu des temps de renouvellement, cette nouvelle génération influencerait peu sur le total des émissions avant 2050.*

*En complément, le transport de fret pourrait bénéficier du développement des dirigeables, dont la consommation attendue est bien inférieure à celle des avions, ce qui nécessite encore des études en recherche et développement. Une filière existe déjà en France pour le développement de dirigeables de 60 tonnes.*

## Impact CO2

Les gains en émissions de CO<sub>2</sub> apportés par ces roadmaps ne sont bien sûr effectifs qu'en fonction de l'acquisition, de la mise en service commercial de ces appareils par les compagnies, de la cadence de renouvellement de leur flotte avec ces appareils (cf. 7.2.2.4) et de la disponibilité et du taux de remplissage effectif de SAF, de la disponibilité de l'H<sub>2</sub> (cf. 7.2.2.3) et des infrastructures aéroportuaires dédiées.

Ainsi, les gains effectifs attendus par la réalisation de la roadmap « INDUS » ou « INDUS+5 » seront évalués en les combinant avec les hypothèses prises concernant les carburants alternatifs et les cadences de renouvellement des flottes, dans le cadre de 2 scénarios dits « convergents » présentés en 7.2.3.

## Externalités

### Financement

L'appel d'offres européen SRIA (Strategic research and innovation agenda) "The proposed European Partnership for Clean Aviation" doit être validé dans le cadre des programmes européens liés au Green Deal (Horizon 2020 puis Horizon Europe). Il affiche :

- Une enveloppe de 12 milliards d'euros d'investissement en Recherches et Innovation pour la période 2020-2030 ;
- Un besoin de 45 milliards d'euros pour le développement de 3 types d'avions (15 milliards € per type) dans la période 2030-2035 (à titre indicatif, le coût d'un programme de développement d'un nouvel avion (ex. A380) est d'environ 10 milliards d'euros) ;

- Un coût estimé de 5.000 milliards d'euros pour le renouvellement de la flotte (26 000 avions) sur la période 2035-2050.

Dans un contexte où la croissance du trafic pourrait être remise en question, de manière subie comme pour la crise COVID ou voulue via des mesures de sobriétés visant à maîtriser les émissions de GES ou la dépendance aux énergies fossiles, la question d'un business-model viable pour les compagnies aériennes et du financement de ces programmes prend une autre dimension. En effet, si le secteur (industrie et compagnies) n'est pas en capacité d'assurer seul le financement de ces programmes ainsi que le renouvellement des flottes, et s'il est assuré par des financements publics, alors la question de la priorisation de l'utilisation de l'argent public se posera, dans un contexte possible de contraction plus générale de l'économie.

### Emplois

Le maintien et le financement de cette roadmap permettrait de maintenir quelques milliers d'emplois directs à forte valeur ajoutée (recherche et développement) par an et d'accompagner la mise en place du programme et la levée des risques technologiques rencontrés par les industriels<sup>244</sup>. Une étude plus détaillée des impacts emplois est présentée au paragraphe 9.

### Filière recyclage

Le développement d'une filière de recyclage des matériaux composites bénéficierait aussi au recyclage de la filière éolienne (qui représente environ le même volume à traiter que le transport aérien).

### Ressources et énergie

La question de la capacité d'approvisionnement en énergies alternatives est au cœur du succès d'une telle stratégie. En ce qui concerne les PTL, l'électricité et l'Hydrogène, ils doivent être produits par des processus bas carbone (Électrolyse pour l'H<sub>2</sub> par exemple), voire décarbonant (captation de CO<sub>2</sub> dans l'air ou en sortie d'usine pour les PTL), eux-mêmes alimentés par de l'électricité bas carbone. La piste privilégiée par le secteur aérien semble être l'éolienne. Dans tous les cas, en fonction de la roadmap et de la cadence de renouvellement, il est nécessaire de dimensionner toute la chaîne de production de carburant alternatif et d'électricité bas carbone. Ce point est particulièrement important au vu des limites physiques de production de carburant, des conséquences sur le parc électrique installé et du contexte probable de concurrence inter-secteurs pour l'accès à ces ressources, chacun devant suivre une trajectoire de baisse de ses émissions. Ce point sera détaillé dans l'analyse des scénarios convergents au paragraphe 7.2.3.

### 7.2.2.3 Utilisation des carburants alternatifs en substitution du kérosène

#### Axe 7 : Utilisation de carburants alternatifs

##### Acteurs concernés

Compagnies aériennes, constructeurs, motoristes, filières carburants et électricité, pouvoirs publics

#### Éléments de contexte

**Les carburants alternatifs sont proposés comme solution centrale pour la décarbonation du transport aérien.**

Dans les trajectoires de réduction des émissions annoncées par le secteur aérien, la cible de 100% d'utilisation de carburants alternatifs à horizon 2050 est avancée (cf. 5.9.1).

Mais à ce jour la production de biocarburant (de 1<sup>ère</sup> génération uniquement pour l'instant, c'est-à-dire en concurrence avec les surfaces agricoles) est **très loin d'être disponible en quantité suffisante pour se substituer au pétrole fossile**. À titre d'exemple, dans leurs Perspectives agricoles 2016-2025<sup>245</sup>, l'OCDE et la FAO indiquent que « la production mondiale d'éthanol devrait progresser modestement, passant de 116 milliards de litres en 2015 à 128.4 milliards de litres à l'horizon 2025. Le Brésil sera à l'origine de la moitié de cette hausse. La production mondiale de biodiesel progressera sous l'impulsion des dispositifs mis en œuvre aux États-Unis, en Argentine, au Brésil et en Indonésie et, dans une moindre mesure, de la réalisation de l'objectif de la DER [Directive sur les Énergies Renouvelables]. Elle devrait ainsi passer de 31 milliards de litres en 2015 à 41.4 milliards de litres en 2025. La production de biocarburants avancés ne devrait quant à elle pas décoller au cours de la période étudiée. » Ceci correspond<sup>246</sup> à un total de 170 milliards de litres en 2025, soit 2,9 millions de barils par jour, ou encore **3,5% de la consommation mondiale de pétrole**.

**Ainsi, le secteur aérien cible de n'utiliser que des carburants de 2<sup>ème</sup> génération** et plus, ceci afin d'éviter la déforestation et la concurrence avec le secteur agro-alimentaire, mais la question des quantités disponibles reste cruciale (cf. 8.1 et Annexe 1 en 12.1).

L'univers des carburants en général, et des carburants alternatifs en particulier (biocarburants, agrocarburants, carburants de synthèse, Hydrogène...) est complexe et révèle des réalités physiques et industrielles très différentes selon le type de carburant considéré.

**Nous proposons ici un tour d'horizon des différents types de carburants, de leur pouvoir de contribution à la réduction des émissions du transport aérien.** L'un des enjeux principaux étant la capacité de production bas carbone et d'approvisionnement, les limites physiques de la production ainsi qu'une trajectoire 2020-2050 sur le périmètre France est également proposée.

244 Clean sky 2 joint undertaking third amended bi-annual work plan and BUDGET 2018-2019 [https://www.cleansky.eu/sites/default/files/inline-files/CS-GB-2019-04-09%20Third%20Amd%20WP%2018-19%20published\\_1.pdf](https://www.cleansky.eu/sites/default/files/inline-files/CS-GB-2019-04-09%20Third%20Amd%20WP%2018-19%20published_1.pdf) page 96/97

245 <http://www.fao.org/3/a-BO103f.pdf>

246 En négligeant, en première approximation, les subtilités de conversion entre litres qui n'ont pas tous exactement le même contenu énergétique.

## Description détaillée

### Tour d'horizon des carburants alternatifs

Les différentes familles de carburants peuvent être représentées comme ci-dessous :

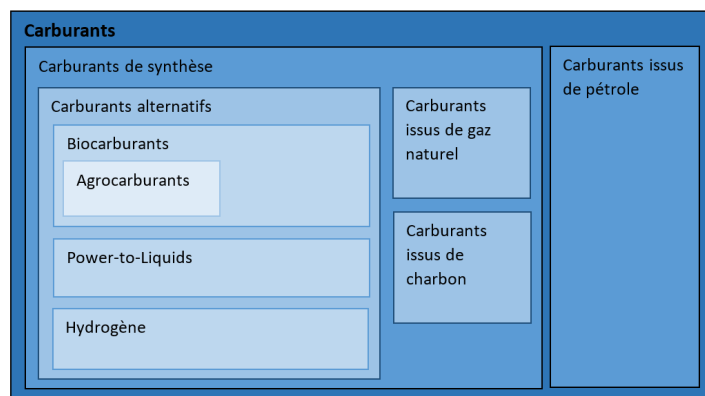


Figure 39 - Les différentes familles de carburant

Un carburant de synthèse, ou Synfuel (abréviation de synthetic fuel en anglais), est un mélange d'hydrocarbures obtenu à partir de toute autre ressource que le pétrole.

Parmi ces carburants de synthèse, il y a ceux issus de ressources fossiles comme le gaz naturel ou le charbon, mais également les autres, dénommés carburants alternatifs. Ces derniers sont intéressants pour leur potentiel énergétique moins carboné que les sources fossiles. Il existe de nombreux types de carburants (combustibles liquide ou gazeux) alternatifs, qui diffèrent principalement selon la matière première utilisée et le procédé de transformation. Ils peuvent être utilisés dans l'aviation comme supplément en les mélangeant à du kérosène usuel avec un ratio variable, selon leurs caractéristiques. Certains, comme l'hydrogène, peuvent être utilisés seuls, mais dans un avion spécifiquement conçu pour cela (cf. 7.2.2.2).

Le Carburant Durable d'Aviation, ou Sustainable Aviation Fuel (SAF) est un carburant alternatif certifié dont les considérations sociales, environnementales et économiques assurent un avantage par rapport au kérosène. **Un SAF est un carburant dit "drop-in", qui peut donc être injecté avec du kérosène sans modification technologique des avions existants.**

**Le biocarburant** (biofuel en anglais), est un carburant alternatif produit à partir de matériaux organiques non fossiles, provenant de la biomasse. Certains sont SAF, d'autres non.

L'agrocarburant constitue un type de biocarburant. Il est produit à partir de produits agricoles uniquement, ce qui n'inclut pas, par exemple, les carburants issus de la biomasse forestière ou des algues. L'appellation anglaise de biofuel peut ainsi facilement porter à confusion.

**Les Power-to-Liquids (PtL)** sont un autre type de carburant alternatif. Ils consistent en une production d'hydrocarbures liquides conçus à partir d'énergie électrique, de dihydrogène (H<sub>2</sub>) (préférentiellement obtenu via un procédé faiblement émissif!) et de CO<sub>2</sub>. L'approvisionnement en CO<sub>2</sub> peut être fait par capture dans l'air ou en provenance directe de sources industrielles.

Le pouvoir décarbonant des biocarburants et des PTL ne s'exprime pas lors de la combustion, qui est aussi émettrice que le kérosène. Il provient de l'absorption amont de CO<sub>2</sub> nécessaire à leur fabrication et de leur processus de fabrication. Ainsi la décarbonation réelle liée à l'utilisation de ces énergies alternatives ne peut s'évaluer qu'en regardant le cycle de vie complet, de la fabrication à la combustion en vol. C'est la raison pour laquelle il est nécessaire d'intégrer également les émissions de la partie amont pour le kérosène (extraction du pétrole, fabrication, transport, ...) si l'on veut pouvoir réellement mesurer l'impact de réduction des émissions (cf. 5.9.2).

Enfin, **l'hydrogène** peut être utilisé comme carburant alternatif pour un avion sous deux formes :

- Avec le processus de combustion directe du dihydrogène dans un moteur thermique
- Dans une pile à combustible qui fournit de l'énergie à des moteurs électriques

Tableau 6 - Quelques idées reçues et quelques réponses sur les carburants alternatifs

| Idee reçue                                                                                                      | Réponse                                                                                                                          | Détail en Annexe |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|
| « Les biocarburants sont en compétition avec l'agroalimentaire et nécessitent de la déforestation »             | <b>Plutôt VRAI</b> pour les carburants de 1ère génération (1G), <b>plutôt FAUX</b> pour les carburants 2ème génération (2G) et + | 12.1.1           |
| « Les biocarburants ont un impact carbone pire que le kérosène »                                                | <b>FAUX</b> pour la majorité                                                                                                     | 12.1.2           |
| « Les émissions « hors CO <sub>2</sub> » des biocarburants sont pires que celles du kérosène »                  | <b>Plutôt VRAI</b>                                                                                                               | 12.1.3           |
| « Les biocarburants ne seront jamais disponibles en quantité suffisante pour fournir le secteur de l'aviation » | <b>Probable</b>                                                                                                                  | 12.1.4           |
| « Tous les avions actuels peuvent voler avec 100% de carburants alternatifs »                                   | <b>FAUX</b>                                                                                                                      | 12.1.5           |
| « Si les carburants alternatifs ne sont pas commercialisés, c'est parce qu'ils coûtent trop cher à produire »   | <b>VRAI et FAUX</b>                                                                                                              | 12.1.6           |
| « L'utilisation de l'hydrogène est sans émissions »                                                             | <b>FAUX</b>                                                                                                                      | 12.1.7           |
| « Une production verte d'hydrogène permettrait un trafic aérien sans impact environnemental »                   | <b>FAUX</b>                                                                                                                      | 12.1.8           |

### Quel pouvoir décarbonant pour les carburants alternatifs ?<sup>247</sup>

La cible du secteur aérien est d'utiliser des carburants de 2ème génération et plus, ceux-ci limitant fortement la déforestation et la concurrence avec le secteur agro-alimentaire. Les carburants considérés ici sont ceux dont le procédé est déjà scientifiquement maîtrisé et qui ont les émissions CO<sub>2</sub> les plus faibles. Ces carburants sont « drop-in », c'est-à-dire qu'ils peuvent être utilisés par les avions actuels.

247 Panorama complet des carburants alternatifs, détails et sources utilisées disponibles dans la Note de Calcul

Ainsi les carburants considérés sont les biocarburants 2G « FT-Synthesis » issus de résidus agricoles, de résidus forestiers et de déchets municipaux, ainsi que les carburants Power-to-Liquid (PTL). L'hydrogène est traité à part car ce n'est pas un carburant « drop-in ». L'hypothèse retenue dans la suite est l'utilisation d'hydrogène liquide (LH<sub>2</sub>), qui minimise le volume de carburant à embarquer pour une même énergie utile disponible. Comme pour les PTL, les émissions de CO<sub>2</sub> liées à l'utilisation de LH<sub>2</sub> dépendent du processus de fabrication et, dans le cas de la synthèse par électrolyse, des émissions de la production d'électricité utilisée. Ainsi, le recours aux technologies Hydrogène et PTL ne sont efficaces pour la décarbonation de l'aviation qu'en dessous d'un certain seuil d'intensité carbone du mix électrique utilisé.

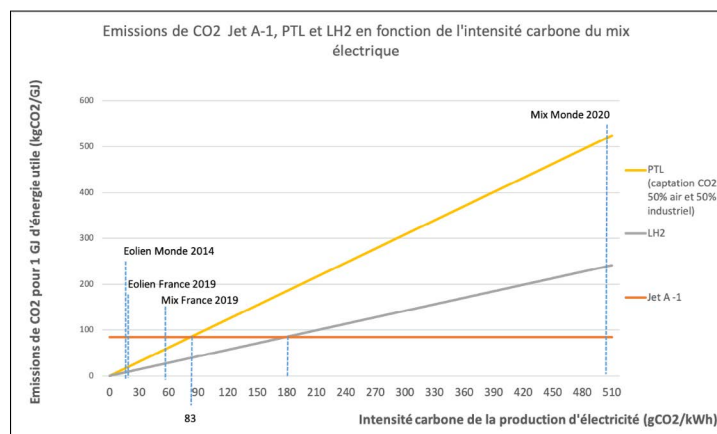


Figure 40 - Émissions jet A-1, LH<sub>2</sub> et PTL selon l'intensité carbone du mix électrique

Ainsi, pour un mix électrique émettant plus de 180 gCO<sub>2</sub> par kWh produit, l'avion à hydrogène émettra plus de CO<sub>2</sub> que l'avion à kérosène. De même pour un mix électrique émettant plus de 83 gCO<sub>2</sub> par kWh produit, l'utilisation de PTL est plus émissive que le kérosène. Dans une stratégie de décarbonation à l'échelle mondiale recourant à l'utilisation massive de ces carburants, il est nécessaire de garantir de l'électricité produite satisfait à ces critères. Plusieurs options apparaissent en première approche :

- **Réduire fortement les émissions du mix électrique monde moyen** (aujourd'hui aux alentours de 500 gCO<sub>2</sub>/kWh<sup>248</sup>) : la meilleure option théorique car elle a un effet global et ne suppose pas de concurrence intersectorielle pour l'accès à l'électricité décarbonée. De fait, ce mix moyen doit baisser pour atteindre les objectifs, mais descendre en dessous de 100 gCO<sub>2</sub>/kWh en moyenne mondiale avant 2050 reste un défi mondial colossal duquel le transport aérien serait dépendant s'il n'était pas acteur dans la chaîne d'approvisionnement bout-en-bout de ses ressources énergétiques.

- **Utiliser uniquement les sources d'énergie bas carbone** : la piste la plus souvent mentionnée par le secteur, en particulier en ce qui concerne l'éolien. D'un point de vue théorique, cela fonctionne (l'éolien émettait 14,9 gCO<sub>2</sub>/kWh en 2019

en France<sup>249</sup> et environ 11 gCO<sub>2</sub>/kWh<sup>250</sup> en 2014 au niveau monde). Le développement à l'échelle de ces énergies est nécessaire et la prévision de demande énergétique du transport aérien doit être intégrée dans ces *roadmaps* de développement. Selon les hypothèses de croissance de trafic envisagées, le besoin en énergie pour le transport aérien pourrait être largement dimensionnant (voir étude des externalités énergétiques par scénario en 7.2.3), et entrerait de fait en concurrence avec les autres secteurs en fonction des capacités disponibles. De plus cette méthode s'expose également à une concurrence vis-à-vis de l'usage direct d'électricité. En effet, les quantités pouvant être produites sont d'autant plus marginales si on se limite, pour l'électrolyse, à l'utilisation d'électricité renouvelable excédentaire (ne pouvant pas être absorbée par le réseau électrique et n'étant ainsi pas en concurrence avec un usage direct de celle-ci).

- Localiser la production de LH<sub>2</sub> et de PTL dans les zones géographiques où l'intensité carbone du mix électrique est la plus faible : cette option fonctionne aussi théoriquement. Par exemple en France, l'intensité carbone du mix électrique est bien en dessous des seuils critiques, en particulier du fait du parc nucléaire (57 gCO<sub>2</sub>/kWh pour le mix électrique et 6 gCO<sub>2</sub>/kWh pour le nucléaire en 2019<sup>210</sup>). La localisation géographique pose néanmoins le problème du transport du carburant jusqu'au réservoir qui augmente la complexité logistique d'approvisionnement (en particulier pour l'hydrogène) et les émissions de CO<sub>2</sub><sup>251</sup>.

Quelle que soit la stratégie envisagée, la question de la production d'électricité bas carbone en quantité suffisante pour le secteur aérien est au cœur des stratégies Hydrogène (LH<sub>2</sub> et PTL), elle constitue l'un de ses facteurs clef de succès.

Tableau 7 - Pouvoir décarbonant des carburants alternatifs considérés dans l'étude France

| Type de carburant alternatif                                           | Comparaison des émissions de CO <sub>2</sub> par rapport au jet conventionnel (kérosène) |                            |                                     |
|------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|-------------------------------------|
|                                                                        | Scénario le moins favorable                                                              | Scénario le plus favorable | Valeur retenue pour les simulations |
| FT-Synthesis à partir de résidus agricoles (blé et maïs) ou forestiers | -87,4%                                                                                   | -90,8%                     | <b>-90,8%</b>                       |
| FT-Synthesis à partir de déchets municipaux                            | -68,3%                                                                                   | -68,3%                     | <b>-68,3%</b>                       |
| Power-to-Liquid                                                        | -78%                                                                                     | -86%                       | <b>-82% *</b>                       |
| LH <sub>2</sub>                                                        | -92%                                                                                     | -92%                       | <b>-92% **</b>                      |

249 ADEME : [https://data.ademe.fr/datasets/base-carbone\(r\)](https://data.ademe.fr/datasets/base-carbone(r))

250 Plusieurs sources concordantes donnent entre 11 et 13, dont GIEC 2014, et Electricity Map (sourced GIEC) : <https://www.electricitymap.org/zone/FR>

251 C'est une problématique d'autant plus forte que des pays tels que le Maroc, l'Arabie et l'Australie prévoient de massivement produire de l'hydrogène (vert et bleu principalement) en vue de l'exporter. L'Allemagne construit déjà des partenariats avec le Maroc, et le Japon et la Corée avec l'Arabie et l'Australie. Ces gouvernements semblent projeter une demande un hydrogène supérieure à leur capacité de production locale, et l'exportation d'hydrogène s'annonce donc comme un enjeu grandissant.

(\*) Hypothèse de 50% de captation de CO<sub>2</sub> dans l'air et 50% des émissions en sortie d'usine, synthétisé à partir d'H<sub>2</sub> par électrolyse et électricité éolienne France

(\*\*) H<sub>2</sub> produit par électrolyse et électricité éolienne France

### Quelle production disponible pour le transport aérien ?

Il est considéré ici que la production alimentant le trafic en France est elle aussi française. Cette hypothèse forte présente les avantages suivants :

- Simplification des chaînes logistiques et de la mise en place de nouveaux réseaux de distribution ;
- Souveraineté nationale sur les carburants utilisés ;
- Proximité entre matières premières, lieux de transformation et aéroports et ainsi limiter les émissions liées au transport de carburant (choix de l'hypothèse de pouvoir décarbonant favorable).

Si cette hypothèse s'avérait limitante au point de remettre en cause les conclusions des « scénarios convergents » présentés en 7.2.3, d'autres pistes seraient à étudier (autres types de carburants, importations).

**Pour les biocarburants**, les limites physiques de production sont liées aux surfaces agricoles ou forestières disponibles ou à la quantité de déchets municipaux annuelle produite. Au vu des incertitudes du sens d'évolution de ces surfaces dans le temps, notamment du fait du changement climatique et de ses conséquences sur les modes de vie et de consommation, les quantités actuelles sont considérées comme stables dans le temps.

**Concernant les PTL**, nous n'avons pas trouvé d'objectif de production officiel suffisamment fiable. Aussi nous prenons l'hypothèse d'une production suffisante permettant d'atteindre l'objectif de 100% de carburant alternatif en 2050 dans le scénario le plus favorable (cf. 7.2.3.1). La production serait alors de l'ordre de 4Mt/an en 2050. À noter que l'ADEME cite l'objectif de 15Mt de CO<sub>2</sub> capté pour le processus CSC (Captage et Stockage Géologique)<sup>252</sup>, ce qui pourrait correspondre à une production de 5Mt de PTL si la captation était utilisée plutôt dans cet objectif. L'ordre de grandeur semble donc acceptable, hors considération des externalités énergétiques de production.

Les carburants FT 2G issus de résidus agricoles et forestiers et ceux issus de déchets municipaux ne sont pas encore commercialisés en France. La technologie est aujourd'hui mûre mais la production est quasi nulle. Le démarrage de la commercialisation en France pourrait se faire rapidement : Il est considéré ici un démarrage au plus vite, en 2021. En revanche, pour la production de PTL, il est nécessaire de mettre en place au préalable la chaîne de production d'hydrogène bas carbone. Il est considéré ici un démarrage en 2030.

Ainsi, si la croissance de la production est envisagée sur un rythme de 25%/an les 10 premières années, puis 15%/an les années suivantes, nous pouvons établir, sous toutes les hypothèses précédentes, un premier scénario de production. L'hypo-

thèse « CAPA 100 » est celle dans laquelle le transport aérien bénéficie en premier de la production. Dans cette hypothèse, les quantités disponibles à horizon 2050 sont les suivantes<sup>253</sup> :

Tableau 8 - Hypothèse «CAPA 100», Production annuelle en 2050

| Année                                                    | Carburant                             | Quantité annuelle disponible pour le transport aérien (Mt) |
|----------------------------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| 2050                                                     | FT 2G Résidus Agricoles (Blé et Maïs) | 1,23                                                       |
|                                                          | FT 2G Résidus Forestiers              | 0,16                                                       |
|                                                          | FT 2G Déchets municipaux              | 1,36                                                       |
|                                                          | PTL                                   | 4                                                          |
| Capacité maximum de production annuelle atteinte en 2050 |                                       | 6,76                                                       |

Dans la suite, nous regarderons également les impacts d'une production disponible « CAPA 50 » en prenant l'hypothèse que le transport aérien n'a accès « qu'à » 50% de la production totale. Il est à noter que cette hypothèse reste très favorable au secteur aérien, et nécessiterait un arbitrage fort en ce sens. Mais elle a pour but essentiellement d'évaluer la sensibilité de ce paramètre sur les trajectoires de décarbonation, d'éclairer une décision sans préjuger, à ce stade, d'un d'arbitrage en faveur ou en défaveur du secteur aérien.

**Concernant l'hydrogène** : Dans son rapport de l'hydrogène en France de 2018<sup>254</sup>, l'Association Française pour l'HYdrogène et les Piles À Combustibles (AFHYPAC) affiche l'objectif d'une capacité de production de 5,5Mt de dihydrogène en France, le tout pour répondre à de nombreux besoins, comme l'alimentation des réseaux de gaz, les besoins des industries chimiques ou encore le transport routier de marchandise. Dans le plan de déploiement de l'hydrogène pour la transition énergétique<sup>255</sup>, le gouvernement français mentionne un besoin national d'environ 1Mt. Ce plan a pour principal objectif la décarbonation de cet hydrogène, aujourd'hui produit à 94% à l'aide d'énergie fossile. Il vise par exemple de décarboner jusqu'à 40% de l'ensemble d'ici 2028 avec un peu plus de 0,1Mt dédié à la mobilité à la même date, le tout au service du transport routier. Pour suivre cette feuille de route, l'état français a prévu un budget de 7,2 milliards d'euros dans les dix prochaines années, associé à l'ambition de créer des Gigafactory de production de dihydrogène, que ce soit à partir d'énergies renouvelables ou d'énergie nucléaire.<sup>256</sup>

Il est considéré dans tous les scénarios suivants que la production d'Hydrogène n'est pas limitée. Néanmoins l'étude des externalités énergétiques associées à la production de l'hydrogène nécessaire et la comparaison avec les feuilles de route actuelles de la France en la matière permettront d'en évaluer la faisabilité et le niveau de sollicitation de la filière Hydrogène par le secteur aérien.

253 Voir détails et références des calculs et trajectoires complète dans la Note de Calcul

254 <http://www.afhypac.org/documents/divers/Hydrogene-en-France-2018.pdf>

255 [https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Plan\\_deploiement\\_hydrogene.pdf](https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Plan_deploiement_hydrogene.pdf)

256 <https://www.revolution-energetique.com/bruno-le-maire-veut-une-gigafactory-francaise-de-production-dhydrogene/>

252 [https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/captage-stockage-geologique-co2\\_csc\\_avis-technique\\_2020.pdf](https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/captage-stockage-geologique-co2_csc_avis-technique_2020.pdf)

## Impact CO2

Les gains en émissions de CO<sub>2</sub> apportés par les carburants alternatifs, ne sont bien sûr effectifs qu'en fonction de leur consommation réelle. Celle-ci dépend du trafic et des types d'appareils constituant la flotte, elle-même conditionnée par la roadmap avion (cf. 7.2.2.2) et la cadence de renouvellement de la flotte (cf. 7.2.2.4.).

Ainsi, les gains effectifs attendus dans les hypothèses « CAPA 100 » et « CAPA 50 » seront évalués en les combinant avec les hypothèses prises concernant les carburants alternatifs et les cadences de renouvellement des flottes, dans le cadre de 2 scénarios dits « convergents » présentés en 7.2.3.

## Externalités

Les conséquences concernant la transformation de la filière carburant ne sont pas étudiées ici. En revanche la production de PTL et d'H<sub>2</sub> nécessite, dans le meilleur des cas, de l'énergie électrique. Ainsi la quantité d'énergie électrique à fournir entraîne 2 conséquences :

- Des émissions de GES, en fonction du Mix énergétique utilisé pour la production de l'électricité
- Le dimensionnement à l'échelle des capacités de production électrique, avec les conséquences associées sur le territoire

C'est le rapport produit par McKinsey&Company pour le compte de Clean Sky 2 « *Hydrogen-powered aviation, A fact-based study of hydrogen technology, economics, and climate impact by 2050* » de mai 2020, soutenu par la plupart des industries françaises concernées par la question de l'hydrogène (dont Airbus et Safran) qui a été pris en référence pour la quantification de l'énergie nécessaire pour produire 1 tonne de dihydrogène ou 1 tonne de PTL. On considère ainsi qu'il faut 1,7kWh d'électricité pour produire 1kWh d'énergie sous forme de H<sub>2</sub> et 4,6kWh d'électricité pour produire 1kWh d'énergie sous forme de PTL à partir de capture directe de CO<sub>2</sub> dans l'air (contre 2,8kWh en récupérant directement le CO<sub>2</sub> produit par les industries). Ces chiffres prennent en compte l'ensemble de la chaîne, à savoir : l'électrolyse permettant de former l'H<sub>2</sub>, la compression, la capture de CO<sub>2</sub> et la synthèse pour les PTL, le transport, le stockage et la distribution.

Le dimensionnement des externalités dépendra donc du scénario choisi. Cependant, pour avoir un ordre de grandeur en tête, s'il était nécessaire de produire les 4Mt de PTL/an, il serait nécessaire de produire **~181 TWh d'énergie électrique, soit 5 fois l'énergie totale produite par le parc éolien français en 2019**<sup>257</sup>.

<sup>257</sup> 45,3 kWh/kg PTL (cf. Note de Calcul), 33,9 TWh produit en France en 2019 par le parc éolien français (source RTE <https://bilan-electrique-2019.rte-france.com/>)

## 7.2.2.4 Accélération du rythme de renouvellement des flottes

### Axe 8 : Accélération du rythme de renouvellement des flottes

#### Acteurs concernés

Compagnies aériennes, banques, loueurs et industriels du secteur aéronautique, pouvoirs publics

#### Éléments de contexte

**Le remplacement des appareils d'ancienne génération composant les flottes des compagnies aériennes par des appareils de nouvelle génération est un processus vertueux en matière de consommation de carburant et donc de réduction d'émissions de gaz à effet de serre.** En effet, le coût carbone de fabrication d'un avion représente une partie très faible des émissions de celui-ci sur l'ensemble de son cycle de vie : les estimations disponibles le situent autour de 0,5%<sup>258</sup>. Ainsi, ce coût carbone est très rapidement rentabilisé (du point de vue des émissions) dès que l'efficacité énergétique d'un nouvel avion est améliorée. À titre d'exemple, il est rapidement intéressant du point de vue des émissions, de remplacer des appareils de la famille A320 CEO par des appareils équivalents de la gamme A320neo dont la consommation en croisière est annoncée comme inférieure de 20%<sup>259</sup>.

**Le gisement de gains en efficacité énergétique est important quand on analyse l'âge moyen et la composition des flottes des compagnies.** À titre d'exemple, la flotte d'Air France a un âge moyen de l'ordre de 14 ans<sup>260</sup> en 2020 et 89% de ses appareils sont des modèles d'ancienne génération. L'âge moyen des avions des flottes de compagnies européennes similaires est 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.

**Aujourd'hui, selon l'OACI, la flotte mondiale est renouvelée tous les 25 ans.**

#### Description détaillée

#### Problématique posée par l'accélération du renouvellement

Accélérer significativement la cadence de renouvellement de la flotte constitue une problématique complexe.

<sup>258</sup> A first step towards the integration of life cycle assessment into conceptual aircraft design, A. Johanning et D. Scholz, 2013

<sup>259</sup> Données constructeur. Source : <https://www.airbus.com/aircraft/passenger-aircraft/a320-family/a320neo.html>

<sup>260</sup> Source : <https://www.airfleets.fr/ageflotte/Air%20France.htm>. L'objectif affiché avant la crise du COVID-19, était de descendre cette moyenne à 10 ans en 2030, d'après le dossier de presse Horizon 2030. Pour information, l'âge moyen des compagnies européennes similaires est de l'ordre de 11 ans, celui des compagnies du golfe sont relativement bas, de l'ordre de 6 ans, à l'instar des compagnies asiatiques.

Pour une compagnie, acquérir des appareils de nouvelle génération (en renouvellement de flotte ou en croissance) peut être intéressant en termes de réduction de coûts d'exploitation et d'amélioration de son bilan environnemental. Cependant, acheter un appareil de nouvelle génération dès sa mise en service représente un investissement lourd dont le ROI à court terme est risqué. En particulier :

- Si un avion d'ancienne génération répondant au même besoin commercial qu'un nouveau reste disponible au catalogue de l'avionneur, les différences de tarifs entre les deux types d'appareils peuvent conduire cette dernière à acquérir le moins cher ;
- Si la compagnie exploite déjà des avions du même type, elle optimisera ses coûts de maintenance en minimisant la diversification de sa flotte ;
- L'achat de modèles d'avion récemment commercialisés comporte également une part de risque pour les compagnies liée à la faible maturité des technologies et donc à une fiabilité réduite. Une compagnie s'équipant expressément des derniers appareils s'expose ainsi à un risque sur l'ensemble de sa flotte, pouvant rapidement conduire à une perte importante de revenus (par exemple : du fait de l'augmentation des coûts de maintenance, de la diminution du taux de disponibilité de sa flotte, etc.). Par ricochet, cela peut entraîner des dépenses pour la filière industrielle liées à des modifications de produits, de nouvelles certifications nécessaires, voire un maintien au sol des nouveaux modèles d'avions.

De plus, en raison de la taille de leurs flottes, de la durée d'exploitation possible d'un avion (de l'ordre de 20 à 25 ans) et du prix élevé d'un nouvel appareil, le rythme de renouvellement dépend également très fortement de la santé financière et de la trésorerie dont disposent les compagnies aériennes (pour les avions dont la compagnie sera pleinement propriétaire, l'avion devant être payé en totalité au moment de sa livraison), de ses perspectives de développement et donc du niveau d'investissement annuel consacré au renouvellement de leur flotte et de leurs capacités de financement auprès des banques (pour l'obtention de prêts ou la négociation d'achats en crédit-bail). En période de crises économiques, le rythme d'investissement ralentit donc naturellement et fortement pour des périodes plus ou moins longues, comme constaté actuellement avec la crise COVID-19 et par le passé lors d'autres crises. De nombreuses compagnies aériennes reportent (voire annulent) les livraisons d'appareils commandés, afin de préserver leurs liquidités.

Du point de vue de l'industrie, accélérer le rythme de renouvellement des flottes signifie augmenter sa capacité de production. Aujourd'hui, 15 à 20 ans séparent deux générations d'un même type d'avions. Etant donné le nombre important d'avions d'ancienne génération en exploitation (116 appareils de la gamme CEO en exploitation chez Air France par exemple), il s'agit donc d'une décision stratégique lourde pour les avionneurs et leurs fournisseurs, particulièrement dans un contexte de crise et d'incertitude business. Elle nécessite d'être planifiée sur le long terme en synchronisation avec le

calendrier des programmes avion, de mobiliser des efforts très importants de recherche et développement, ainsi que de lourds investissements industriels et humains.

## Impact CO2

### Hypothèses structurantes d'étude<sup>261</sup>

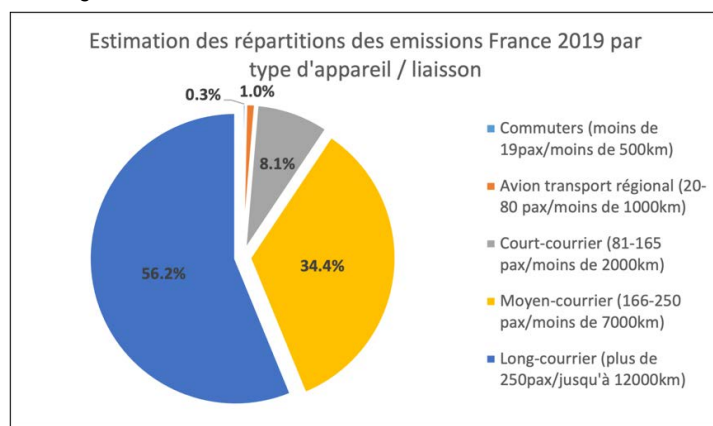
**Nous étudions ici les impacts d'un renouvellement des flottes en 15 ans contre environ 25 ans à l'heure actuelle, quelle que soit la catégorie d'appareil considérée.**

Le renouvellement de la flotte s'appuie sur une roadmap avion qui définit le calendrier de mise à disposition de nouveaux appareils et de leur niveau de performance (cf. 7.2.2.2).

Le modèle utilisé fonctionne selon les règles suivantes :

- Chaque année, 1/15<sup>ème</sup> ou 1/25<sup>ème</sup> de la flotte d'un type d'appareil donné (Commuter, Régional, Court-courrier, Moyen-Courrier ou Long-Courrier) est renouvelée avec le meilleur appareil disponible selon la roadmap avion.
- Les nouveaux appareils remplacent les moins performants de la flotte.

Sur le périmètre de cette étude, le gain annuel en émissions de CO<sub>2</sub> est obtenu en appliquant le gain en performance de la flotte renouvelée au prorata des émissions évaluées en 2019 sur le périmètre France par type d'appareil. Cette évaluation est basée principalement sur le rapport DGAC sur les émissions gazeuses de 2019<sup>262</sup>



**Figure 41 - Répartition des émissions France 2019 par type d'appareil / liaison**

Ce graphique reflète la répartition de trafic par type d'appareil de la flotte 2019, des appareils ayant contribué au trafic France mesuré par la DGAC, toutes compagnies confondues. Cette répartition de trafic est supposée constante dans le temps. Ainsi, si la flotte moyen-courrier améliore ses performances de 50% pour une année donnée, la contribution à la réduction totale des émissions associée sera évaluée à  $50\% \times 34,4\% = 17,2\%$ .

<sup>261</sup> Voir détail du modèle, des hypothèses, des sources et des simulations dans la Note de Calcul

<sup>262</sup> [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)

Il est à noter que cette hypothèse est structurante, car elle conditionne fortement l'efficacité réelle de la roadmap avion sur la décarbonation. En effet, la répartition monde évaluée par McKinsey dans le rapport pour l'ICCT, le moyen-courrier est évalué à 42% et le long-courrier 30%. L'impact du renouvellement de la flotte moyen-courrier monde avec un avion à hydrogène par exemple sera donc supérieur à celui observé sur le périmètre France où la taille du territoire métropolitain, les liaisons Outre-Mer et l'attractivité touristique mondiale favorise plutôt le trafic long-courrier.

La simulation consiste ainsi à comparer, sur la base d'une trajectoire d'émissions optimisée par les axes précédents, pour une roadmap avion donnée, les réductions d'émissions dans le cas d'un renouvellement à 15 ans et d'un renouvellement à 25 ans.

Enfin, au vu du contexte de crise actuel, il a été considéré que l'accélération à 15 ans du renouvellement des flottes ne pouvait démarrer qu'à partir de 2025.

Les gains effectifs attendus s'évaluent en intégrant les hypothèses de roadmap avion, production de carburant alternatif et cadence de renouvellement. C'est l'objet des « Scénarios convergents » présentés en 7.2.3.

### Possibilités de mise en œuvre

La réalité économique actuelle rend la mise en œuvre de cet axe particulièrement difficile dans le contexte fortement concurrentiel et international du transport aérien. Néanmoins, la diffusion rapide du progrès technologique dans les flottes en vol est essentielle dans le contexte du changement climatique. Aussi, il est important de regarder les différentes options pour favoriser / imposer le renouvellement.

**Soutenir financièrement le renouvellement des flottes**  
**L'accélération du renouvellement des flottes implique de dépenses regroupées sur une période plus courte pour les compagnies aériennes.** En ordre de grandeur, les coûts d'acquisition à trafic constant sont multipliés par 1,7 (par exemple pour Air France, achat de 17 avions neufs en moyenne par an au lieu de 10). Cette augmentation ne sera compensée que partiellement par les économies de carburant réalisées.

Dans le contexte actuel de crise COVID-19, un soutien financier, par exemple de l'État, aux compagnies, ciblé sur le renouvellement de leurs flottes pour rendre les dépenses associées soutenables, semble indispensable. Des premiers moyens ont été mis en place depuis début juin 2020 par le gouvernement dans le cadre du plan de soutien à la filière aéronautique<sup>263</sup>. Ils ont en premier lieu pour but d'accroître le soutien de Bpifrance assurance export pour les exportations du secteur, l'assurance-crédit publique jouant le rôle d'amortisseur de crise. Ils permettent en outre, à la demande d'une compagnie, la mise en place d'un moratoire de

12 mois à partir de fin mars 2020 sur les remboursements en principal des crédits à l'exportation qui lui avaient été octroyés<sup>264</sup>.

L'encouragement et le soutien financier pourraient continuer dans la durée sous la forme d'un équivalent de « prime à la casse » sur les avions remplacés, à l'instar des mesures proposées pour le secteur automobile<sup>265</sup>. Pour qu'elle apporte les bénéfices attendus, son montant ou sa forme doivent apporter suffisamment de souplesse à la trésorerie des compagnies. Son obtention doit de plus être soumise à des conditions strictes. Par exemple : conformité anticipée de l'appareil de remplacement aux critères post 2028 du standard OACI de certification des émissions CO<sub>2</sub> d'un avion, consommation par passager kilomètre de l'avion de remplacement réduite d'au moins 10% par rapport à celle de l'appareil remplacé, démantèlement obligatoire de l'avion remplacé par une entreprise certifiée située sur le territoire de l'Union Européenne, etc. Des bonus à la prime pourraient aussi être accordés en cas de réduction de la taille de flotte, si plusieurs anciens appareils sont remplacés par un seul de nouvelle génération.

La question du soutien financier pose la question des conditions de concurrence entre les compagnies si elles ne sont pas soutenues à la même hauteur. Une harmonisation des conditions de soutien au niveau de l'Union Européenne serait souhaitable. Néanmoins, cette piste peut être regardée au niveau national dans le respect des règles de la concurrence. Nous touchons du doigt que mettre en priorité les objectifs vitaux de décarbonation peut nécessiter en général de remettre en cause les règles communes de fonctionnement ayant prévalu jusque-là.

Une partie de ce soutien pourrait être financé par la taxe décrite ci-après.

Du point de vue de l'industrie, cette montée en cadence pourra prendre plusieurs années pour se mettre en place. Sur le moyen terme, il est donc nécessaire d'accompagner financièrement les acteurs de l'industrie aéronautique dans la modernisation de leur outil de production, à la fois pour le rendre plus compétitif et assurer des performances environnementales au meilleur niveau, ainsi que dans la consolidation de la filière. Cela pourra se faire notamment au travers des initiatives mises en place par le gouvernement dans le cadre du plan de soutien à la filière aéronautique<sup>266</sup>, qui pourraient ainsi être prolongées ou reconduites durant la prochaine décennie pour cet objectif précis.

264 Les compagnies bénéficiaires doivent s'engager à ne pas verser de dividendes ou d'autres montants à leurs actionnaires (incluant les prêts) et à ne pas mettre en œuvre de programmes de rachat d'actions, jusqu'au remboursement complet de la partie reportée du crédit

265 <https://www.economie.gouv.fr/covid19-soutien-entreprises/mesures-plan-soutien-automobile>

266 Plan de soutien à la filière aéronautique | [economie.gouv.fr](https://www.economie.gouv.fr), section « Le soutien à l'offre en consolidant la filière et renforçant ses investissements pour améliorer sa compétitivité ». À ce jour notamment, on peut noter les 630 millions d'euros ont été débloqués pour consolider la filière (voir article des Echos du 28 juillet 2020 : Aéronautique : plus de 600 millions d'euros débloqués pour consolider la filière)

263 [https://www.economie.gouv.fr/covid19-soutien-entreprises/plan-soutien-filiere-aeronautique#section « Le soutien à la demande avec le renouvellement d'une flotte plus écologique »](https://www.economie.gouv.fr/covid19-soutien-entreprises/plan-soutien-filiere-aeronautique#section-Le%20soutien%20a%20la%20demande%20avec%20le%20renouvellement%20d'une%20flotte%20plus%20écologique)

### Bonus / Malus par voie réglementaire selon la performance des appareils

Dans un premier temps, une taxe aéroportuaire (à l'atterrissage) pourrait être mise en place. Le montant augmenterait progressivement d'année en année, proportionnellement à l'écart entre la consommation par passager kilomètre de l'avion opéré par une compagnie desservant l'aéroport concerné et celle du meilleur type d'avion commercialisé capable d'opérer sur la ligne. Cette taxe pourrait être reportée sur le prix du billet, ce qui, accompagné d'une information de sensibilisation sur le sujet (cf. 7.4.2) permettrait à l'utilisateur final de pouvoir être acteur dans le choix de son appareil de vol et favoriserait naturellement le remplissage des avions les plus performants.

Dans un deuxième temps, les modèles d'appareils pour lesquels il existe depuis au moins 10 ans un modèle commercialisé équivalent en portée et en capacité et dont la consommation par passager kilomètre est inférieure d'au moins 10% seraient interdits de décollage et d'atterrissage sur les aéroports français. Les avions autorisés devront de plus être conformes aux critères définis dans le standard OACI de certification des émissions CO<sub>2</sub> d'un avion<sup>267</sup>. L'échéancier d'application de ce standard pourra servir de base au calendrier d'entrée en vigueur de cette interdiction.

Cette réglementation devrait être appliquée à toutes les compagnies atterrissant sur le territoire Français. Pour augmenter la portée de la mesure et réduire les risques de reports de trafic sur des hubs aéroportuaires limitrophes, une harmonisation de la réglementation au niveau de l'Union Européenne a minima serait plus que souhaitable.

## Externalités

### Financement public

À partir du moment où de l'argent public intervient dans le fonctionnement d'un secteur économique, et contribue à creuser la dette pour l'ensemble de la population, actuelle et à venir, il sort de sa seule problématique sectorielle. Au même titre que les émissions de GES, ce point ne concerne pas que les acteurs du secteur et ses clients, mais bien tout le monde. L'objet de ce rapport s'arrête aux frontières du secteur aérien, néanmoins, il est important d'avoir en tête que les décisions d'investissement dans le contexte d'une trajectoire globale de réduction de GES devront elles aussi faire l'objet d'arbitrages inter-secteurs. La question de l'anticipation et des usages prioritaires est alors essentielle dans l'objectif de garder au mieux la maîtrise de son développement.

### Emplois

**L'accélération du renouvellement des flottes permet de créer ou de préserver une partie des emplois industriels dans toute la filière de la construction aéronautique, en lien avec le maintien du besoin en nouveaux avions.** Les conséquences sur l'emploi industriel sont liées au développement des roadmaps avions et à la cadence de production, tirée par la demande des compagnies, elle-même fortement dépendante des prévisions de trafic et de leur capacité de

financement. Dans un contexte de crise, l'équilibre entre ces différents paramètres est particulièrement complexe et pourrait conduire à une évolution des modèles économiques. L'étude sur l'emploi est détaillée au paragraphe 0.

## 7.2.3 Scénarios convergents<sup>268</sup>

L'étude des différents axes techniques pour réduire les émissions de CO<sub>2</sub> du transport aérien est conditionnée par un ensemble d'hypothèses structurantes qui, en fonction de leur niveau de réalisation pourraient changer significativement les trajectoires d'émissions. En particulier les axes 6 Innovation, 7.2.2.2, 7 Carburants alternatifs 7.2.2.3, et 8 Renouvellement des flottes, 7.2.2.4 sont fortement inter-dépendants les uns des autres, et fortement dépendants du contexte de crise et de reprise, de décisions stratégiques à venir, de financements, d'arbitrages inter-secteurs, du succès de projets industriels, de politiques énergétiques...

Ainsi, s'il n'est pas raisonnable de prédire l'avenir dans ce contexte, il est possible de regarder l'influence des paramètres structurants du modèle et influant sur les trajectoires d'émissions du transport aérien.

**Pour ce faire nous avons fait varier ces paramètres au travers de 2 scénarios, dits scénarios convergents : les scénarios « MAVERICK » et « ICEMAN »<sup>269</sup>, pour en analyser les résultats et les externalités associées.**

Dans ce paragraphe, l'hypothèse de trafic ne varie pas : retour du trafic du niveau de 2019 en 2024 puis augmentation de 4% par an entre 2025 et 2050. L'objectif est bien de regarder l'influence des paramètres techniques pour un trafic donné. Les hypothèses de trafic seront ajustées si nécessaire dans la suite afin d'atteindre le budget carbone défini en 5.9.3.

Retrouver le tableau récapitulatif des hypothèses des deux scénarios en annexe 13.3.4 en page 130.

### 7.2.3.1 Scénario « MAVERICK »

#### Scénario « MAVERICK »

#### Définitions et Hypothèses

Dans le scénario « MAVERICK », les paramètres de performance technique sont poussés à leur maximum. C'est un scénario dans lequel :

- La roadmap avion optimiste de l'industrie est au rendez-vous (Roadmap « INDUS », définie en 7.2.2.2). La production de carburants alternatifs France va en priorité au transport aérien (Hypothèse « CAPA 100 » définie en 7.2.2.3).
- Les flottes de toutes les compagnies contribuant aux émissions du périmètre France sont renouvelées en 15 ans à partir de 2025 (Hypothèse « 15 ans » définie en 7.2.2.4).

<sup>267</sup> [https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/Clima-Change\\_TechnologyStandards.aspx](https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/Clima-Change_TechnologyStandards.aspx)

<sup>268</sup> Le détail des données, calculs et sources associés à l'établissement de ces scénarios est disponible dans la note de calcul

<sup>269</sup> S'il ne mourait pas, ce scénario aurait été nommé GOOSE

- L'hydrogène nécessaire aux avions à hydrogène ou à la synthèse des PTL est produit par électrolyse et le mix électrique associé est 100% éolien, avec les performances de l'éolien français de 2019.

- Le programme CORSIA\* (CORSIA sur toutes les routes y compris domestiques, toutes compagnies) est appliqué et la compensation est effectivement décomptée des émissions.

**C'est un scénario à forts risques, dont on peut discuter le réalisme, qui maximise l'efficacité de réduction des émissions par la voie technique, qui maximise le potentiel de CORSIA au-delà de son périmètre réel, qui maximise les emplois du secteur et qui nécessite le plus d'investissement.**

## Trajectoires carbone

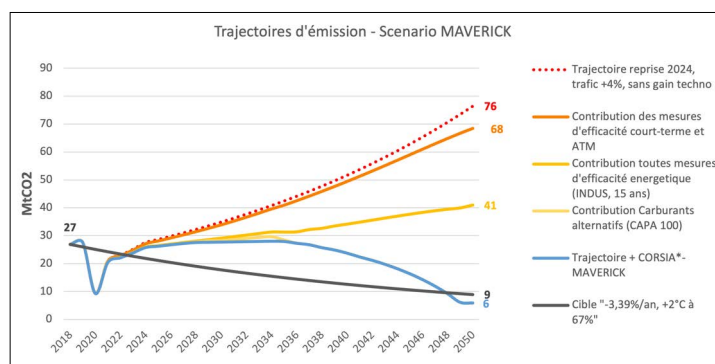


Figure 42 - Émissions annuelles, Scénario « MAVERICK » - France

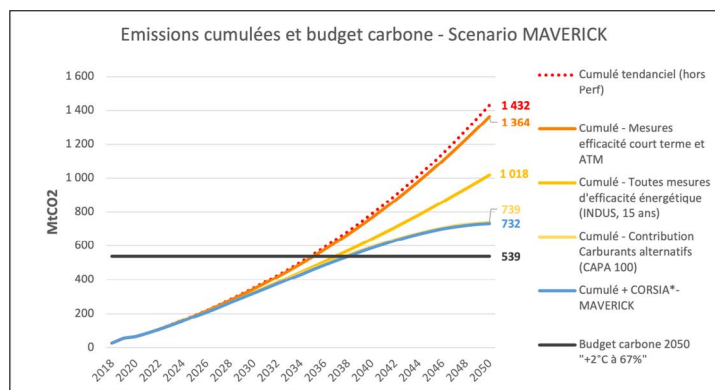


Figure 43 - Émissions cumulées et budget carbone, Scénario « MAVERICK » - France

## Faits marquants

Le renouvellement de la flotte en 15 ans à partir de 2035 avec des court/moyen-courriers à Hydrogène et des long-courriers à 100% de taux d'incorporation de carburant alternatif et améliorant les performances de 25% permet d'infléchir la courbe d'émissions de manière déterminante

En 2050, toute la flotte Régionale, court et moyen-courrier est renouvelée avec des avions à Hydrogène, toute la flotte long-courrier est renouvelée avec le nouvel avion et vole avec 100% de carburants alternatifs dans les réservoirs.

La trajectoire d'amélioration ultra-performante fait que CORSIA\* ne joue que très peu (6 Mt CO<sub>2</sub> compensées entre 2028 et 2034).

## Résultats et Impacts CO2

**La progression de l'efficacité énergétique annuelle moyenne est de 2,14% à partir de 2024, soit au-delà des scénarios optimistes du secteur.**

Pourtant, le budget est dépassé autour de 2038 et les émissions cumulées le dépassent d'environ 36% in fine.

L'inflexion significative de la courbe des émissions arrive presque au moment où le budget est atteint, le rythme de décarbonation ne suffit pas à rester dans le budget.

## Consommation et externalités énergétiques

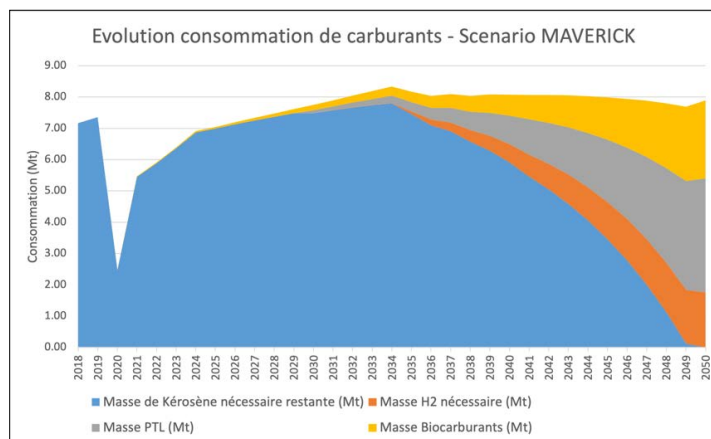


Figure 44 - Trajectoire de consommation de carburants dans le Scénario « MAVERICK » - France

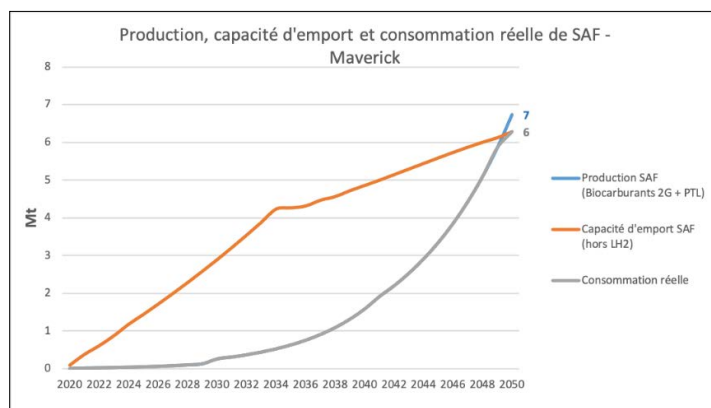


Figure 45 - Production, capacité d'emport et consommation réelle SAF (Biocarb 2G et PTL) - « MAVERICK » - France

| Consommation de carburant en 2050 (Mt) |              |      |                           |
|----------------------------------------|--------------|------|---------------------------|
| Jet A-1                                | Biocarburant | PtL  | H <sub>2</sub> (hors PtL) |
| 0                                      | 2,49         | 3,65 | 1,76                      |

Tableau 9 - Consommation de carburants en 2050 dans le Scénario « MAVERICK » - France

Les quantités cibles ne sont pas limitées par les hypothèses prises en production de carburant. En revanche, avant 2049, les quantités disponibles restent inférieures aux besoins (cf. Figure 45). Accélérer la production de carburant alternatifs pour arriver plus rapidement à la cible, c'est-à-dire aller au-delà d'une croissance de 25% puis 15% par an, permettrait d'améliorer les émissions carbone de ce scénario.

L'énergie électrique nécessaire pour produire ces quantités de PtL et d'H<sub>2</sub> est de 265 TWh (165 TWh pour les PtL et 100 TWh pour l'H<sub>2</sub>), ce qui nécessiterait un parc éolien dédié au transport aérien environ 8 fois supérieur au parc éolien français total installé en 2019.

Concernant la production d'hydrogène, l'objectif de 1Mt/an (cf. 7.2.2.3) est largement dépassé dans ce scénario (d'autant plus si l'on inclut l'hydrogène nécessaire à la synthèse de PTL).

**Les externalités énergétiques de ce scénario sont donc considérables, en particulier du point de vue de la production électrique.** Afin de la réduire, une piste pourrait être d'augmenter le niveau de biocarburant et de baisser la production de PtL. Il faudrait alors regarder les solutions d'importation ou miser sur d'autres types de carburants (3ème génération, ...). Dans tous les cas, il apparaît que le dimensionnement prévu par la filière énergétique française ne suffit significativement pas à satisfaire les besoins d'un tel scénario.

## Externalités emplois

**Ce scénario est plus favorable aux emplois de l'industrie.** Les impacts emplois des scénarios sont étudiés plus en détail au paragraphe 9.

## Pousser encore plus loin ?

En simulant la disponibilité de la production cible (2,73 Mt) dès 2030 pour les biocarburants et dès 2040 pour le PtL, les émissions cumulées passent de 732 MtCO<sub>2</sub> à 555 MtCO<sub>2</sub>. Avec 2,73 Mt de biocarburant en 2030, nous serions à ~34%, soit ~7 fois plus que l'objectif fixé dans la feuille de route du gouvernement en décembre 2020<sup>270</sup>. Dans cette hypothèse, de fait plus qu'irréaliste en l'état des prévisions, l'économie est conséquente, mais encore insuffisante. La production est dans ce cas supérieure aux besoins dès 2030. Il faudrait alors avancer la date de mise en service du long-courrier à 2032 pour rester dans le budget. Les externalités organisationnelles et énergétiques ne sont pas regardées ici car ce scénario est plus qu'irréaliste. Il permet en revanche d'apprécier la hauteur du mur qu'il faudrait franchir dans une solution purement technologique.

<sup>270</sup> 7,98 Mt de kérosène nécessaires en 2030 dans le scénario « MAVERICK » France (voir note de calcul), objectif de 5% de biocarburant en 2030 pour l'aérien fixé dans la feuille de route de décembre 2020 : <https://www.ecologie.gouv.fr/biocarburants#e6>

## Conclusions

Le scénario « MAVERICK » en l'état ne permet pas d'atteindre les objectifs de décarbonation et génère des externalités énergétiques considérables, à un niveau vraisemblablement non anticipé à ce jour par la filière Hydrogène et énergie française. Accélérer la cadence de production de carburant alternatif permettrait néanmoins de l'améliorer, sans pour autant atteindre le résultat carbone. Il est donc très risqué et peu réaliste en l'état.

### 7.2.3.2 Scénario « ICEMAN »

## SCÉNARIO ICEMAN

### Définitions et Hypothèses

**Dans le scénario « ICEMAN », les hypothèses de réalisation technique sont plus prudentes.** C'est un scénario dans lequel :

- La roadmap avion optimiste de l'industrie affiche un décalage de 5ans (Roadmap « INDUS+5 », définie en 7.2.2.2).
- Le transport aérien ne peut bénéficier « que » de 50% de la production de carburants alternatifs français (Hypothèse « CAPA 50 » définie en 7.2.2.3).
- Les flottes de toutes les compagnies contribuant aux émissions du périmètre France sont renouvelées en 25 ans (Hypothèse « 25 ans » définie en 7.2.2.4).
- L'hydrogène nécessaire aux avions à hydrogène ou à la synthèse des PTL est produit par électrolyse et le mix électrique associé est 100% éolien, avec les performances de l'éolien France de 2019.
- Le programme CORSIA\* (CORSIA sur toutes les routes y compris domestiques, toutes compagnies) est appliqué et la compensation est effectivement décomptée des émissions

## Trajectoires carbone

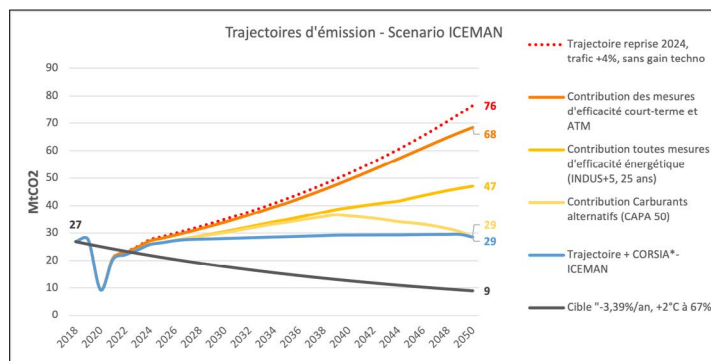


Figure 46 - Émissions annuelles, Scénario « ICEMAN » - France

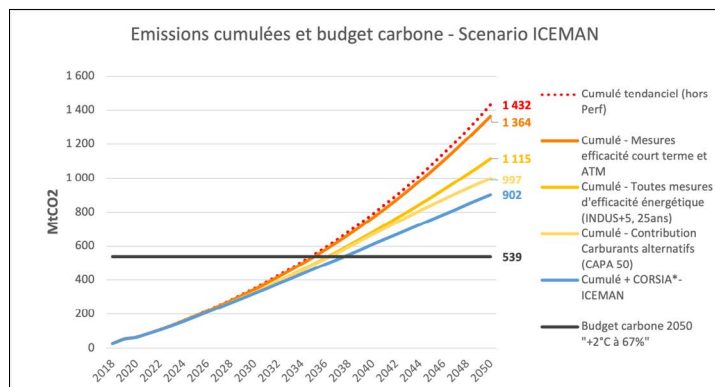


Figure 47 - Émissions cumulées et budget carbone, Scénario « ICEMAN » - France

## Faits marquants

Le processus de décarbonation est trop lent, il n'arrive pas à revenir au niveau de 2019 avant 2050.

En 2050, le renouvellement des flottes Moyen-courrier et Long courrier n'est pas terminé, seule 40% de la flotte est renouvelée. En effet, la nouvelle génération d'appareil a été mise en service en 2040 et le renouvellement se fait en 25 ans.

Les émissions sont tout le temps au-dessus du niveau de 2019, la compensation CORSIA\* tourne à plein régime (95 Mt CO<sub>2</sub> compensées entre 2027 et 2049). Ce qui générerait des coûts de compensation importants pour les compagnies.

## Résultats et Impacts CO2

**La progression de l'efficacité énergétique annuelle moyenne est de 1,61% à partir de 2024, c'est en-dessous des scénarios optimistes du secteur mais cela reste un objectif ambitieux, loin d'être acquis d'avance.**

Le budget est dépassé autour de 2038 et les émissions cumulées le dépassent d'environ 67% in fine. Ce chiffre est atteint en grande partie grâce à la compensation

**Si le rythme de décarbonation est ralenti, notamment en début de période, le budget est inatteignable dans ces hypothèses.**

## Consommation et externalités énergétiques

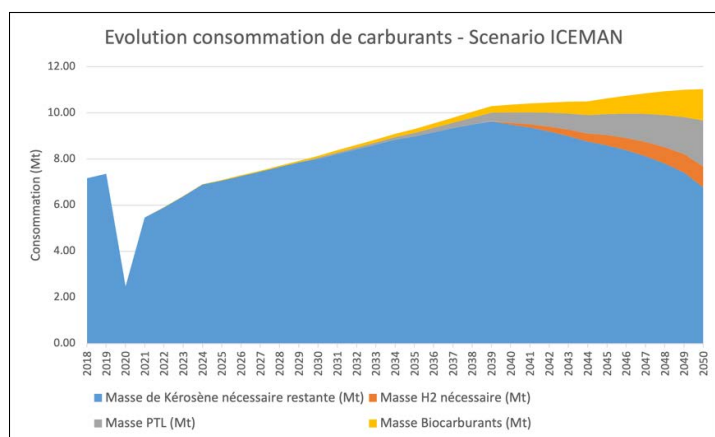


Figure 48 - Trajectoire de consommation de carburants dans le Scénario « ICEMAN » - France

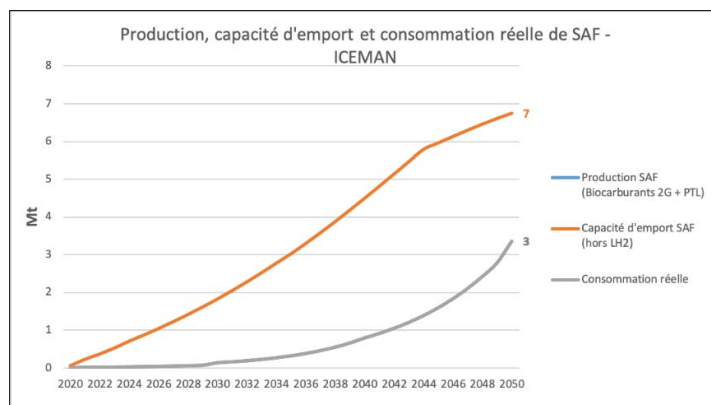


Figure 49 - Production, capacité d'emport et consommation réelle SAF (Biocarb 2G et PTL) - « ICEMAN » - France

### Consommation de carburant en 2050 (Mt)

| Jet A-1 | Biocarburant | PtL | H <sub>2</sub> (hors PtL) |
|---------|--------------|-----|---------------------------|
| 6,77    | 1,37         | 2   | 0,9                       |

Tableau 10 - Consommation de carburants en 2050 dans le Scénario « ICEMAN » - France

La production disponible ne répond pas aux besoins dans ce scénario, elle est utilisée à 100% durant toute la période (cf. Figure 49). Accélérer la production améliorerait le résultat du scénario mais ne permettrait pas d'atteindre la cible dans tous les cas.

L'énergie électrique nécessaire pour produire ces quantités de PtL et d'H<sub>2</sub> est de 141 TWh (91TWh pour les PtL et 50 TWh pour l'H<sub>2</sub>), ce qui nécessiterait un parc éolien dédié au transport aérien environ 4 fois supérieur au parc éolien français total installé en 2019, soit 2 fois moins que dans le scénario « MAVERICK »

Concernant la production d'hydrogène, l'objectif de 1Mt/an (cf. 7.2.2.3) est dans l'ordre de grandeur, néanmoins, cela signifierait de 90% de cette production devrait être dédiée au transport aérien à la cible.

Les externalités énergétiques de ce scénario sont plus atteignables dans ce scénario. Néanmoins, elles ne sont pas négligeables et nécessitent un alignement à l'échelle de la filière énergétique et un arbitrage favorable au transport aérien.

## Conclusions

Le scénario « ICEMAN » présente plus de marges pour la gestion des risques industriels, pour l'approvisionnement en carburants alternatifs et la gestion des externalités énergétiques. Cependant, tout en représentant un défi important pour sa mise en œuvre, il s'éloigne fortement de la cible de décarbonation malgré une forte sollicitation du système de compensation. Il n'est donc pas acceptable seul en l'état.

## 7.2.4 Conclusion

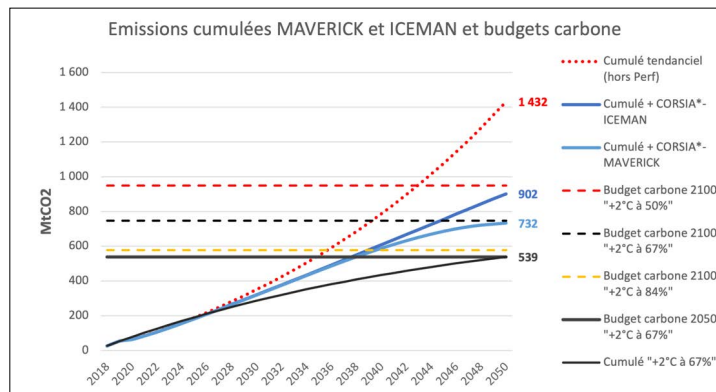


Figure 50 - Cumulés « MAVERICK » et « ICEMAN » France comparés aux budgets carbone

**Même dans le scénario le plus optimiste, engendrant des externalités énergétiques considérables, si le trafic reprend une croissance de 4% à partir de 2024, le progrès technique seul n'est pas assez rapide pour contenir la croissance des émissions de GES et rester dans un budget carbone permettant de rester sous les +2°C avec une probabilité de 67% à horizon 2050.**

Dans le scénario le plus prudent, on atteint quasiment le budget total disponible à horizon 2100 en abaissant la probabilité à 50%, avec donc aucune possibilité d'émission entre 2050 et 2100.

Il reste donc théoriquement 3 options pour rester dans le budget :

- **Parier sur encore plus d'améliorations techniques, plus rapides.** Le scénario « MAVERICK » pousse déjà les paramètres d'amélioration au-delà des projections du Secteur. **Ainsi, il est extrêmement risqué, et manifestement pas acceptable au vu des enjeux climatiques, de ne parier que sur cette piste.**

- **Augmenter le budget carbone pour le secteur aérien.** Le budget total n'étant pas négociable, sauf en cas de révision des prévisions du GIEC, l'augmentation du budget carbone du secteur aérien ne peut se faire qu'au détriment d'autres secteurs. Dans la mise en œuvre des scénarios techniques, le secteur aérien est déjà en arbitrage fort avec les autres secteurs sur l'accès aux ressources et aux énergies bas carbone, le financement de l'innovation et de l'accélération des cadences de production. Un arbitrage sur le budget carbone reste possible théoriquement (c'est le cas dans la SNBC pour le transport national uniquement), mais nécessite une gouvernance légitime, basée sur l'analyse des budgets carbone et englobant le périmètre complet de l'activité et des émissions du transport aérien (cf. Proposition 0 au paragraphe 6). Cette gouvernance n'existe pas à ce jour.

- **Revoir l'hypothèse de trafic à la baisse.**

C'est cette dernière piste que nous nous proposons d'étudier maintenant.

La réduction du trafic peut être subie, comme c'est le cas actuellement, ou anticipée dans une dynamique de sobriété des usages permettant au transport aérien de se maintenir sur le long terme en maîtrisant ses émissions de GES. La **sobriété des usages** peut venir d'une réduction de l'offre de transport ou peut se traduire en une baisse de la demande. Ce sont ces 2 pistes que nous nous proposons d'étudier dans la suite, en évaluant les conséquences sur l'emploi dans le secteur.

## 7.3 Adapter l'offre de l'aérien pour inciter à la sobriété et à la complémentarité avec des modes de transport moins émissifs

### 7.3.1 Introduction

Le transport aérien contribue aujourd'hui fortement au rapprochement des territoires et des peuples, ainsi qu'au modèle économique globalisé. Entrer dans une dynamique de maîtrise volontaire du trafic n'est donc pas une décision simple, à prendre de manière isolée. Elle nécessite de re-questionner les usages, d'évaluer les impacts économiques et sociaux et d'accompagner la transition. Elle s'inscrit dans un projet de transformation de nos modes de vie basé sur de nouvelles priorités. Ce projet est aujourd'hui à construire.

Adapter l'offre de transport dans cet objectif c'est acter implicitement la priorité de certains usages sur d'autres, à l'intérieur du paysage global des transports disponibles et de l'évolution du besoin de transport dans le contexte du changement climatiques et des transformations sociétales qu'il provoque.

4 axes de d'adaptation de l'offre ont été étudiés.

### 7.3.2 Densifier les cabines

**Axe 9 : Diminuer le nombre de cabines First et Business au profit des cabines plus denses**

**Acteurs concernés**

Compagnies aériennes, Entreprises (Politiques RH et mobilités), Secteur du Travel Management, Pouvoirs publics

#### Éléments de contexte

**Les sièges des cabines Affaires (ou Business) et First sont plus lourds et prennent plus de place que les sièges Economy. Ainsi, la consommation par passager de classe dite Affaires est 3 à 5 fois plus élevée qu'en classe économique<sup>271</sup>.** C'est-à-dire que le passager de classe affaires brûle 50 à 100 litres par heure en plus que son semblable de classe économique. Sur un aller-retour France-Chine ou France-Californie de 20 heures, la différence de surconsommation d'une place affaire est de 1000 à 2000 litres par rapport à une place économique.

<sup>271</sup> Un siège business occupait environ la surface de trois sièges éco et qu'un siège Première occupe la surface de six sièges éco, cf. Note de calcul

## Description détaillée

**Une part plus faible de sièges Business permettrait d'absorber une partie de l'augmentation du nombre de passagers sans augmenter le trafic aérien, ou de diminuer le nombre de vols à demande constante.**

La baisse du trafic Business et First doit être lissée et accompagnée de régulations limitant la demande dans le cadre de l'engagement d'une baisse des émissions globales. Dans le système aérien actuel, une augmentation résultante de la capacité de la classe Economy entraînerait les compagnies à stimuler davantage la demande afin de combler la surcapacité, augmentant les émissions en absolu.

L'achat de sièges par les compagnies aériennes se fait tous les 7 / 8 ans. Il est donc envisageable de commencer cette transition avec l'équipement des prochains sièges à changer ou ceux des avions en commande. On peut également évoquer les progrès techniques pour généraliser les sièges "quick changes", c'est-à-dire de remplacer un certain nombre de rangs de sièges business par des rangs de sièges éco en peu de temps (en moins d'1 mois d'immobilisation avion). Généraliser ce type de modification cabine, avec des évolutions technologiques pour faire la modification en moins de 48 heures, permettrait d'optimiser ces cabines "plus consommatrices en CO<sub>2</sub>" à la demande, de façon plus serrée. Par exemple, en période estivale, la compagnie peut densifier sa cabine pour répondre au besoin de voyages loisirs en remplaçant les sièges business vides étant donné que la demande de voyages d'affaires diminue. Ainsi, la flexibilité de la cabine permet de diminuer le nombre de vol à demande constante, et également d'optimiser l'efficacité et le revenu de la compagnie.

## Possibilités de mise en œuvre

### Légiférer sur une densité passager minimale par avion

Un ratio minimal entre le nombre de sièges de la configuration opérationnelle de l'avion par rapport au nombre de siège maximum de cet avion, soit une configuration «tout éco», pourrait être fixé par voie législative à horizon 5 ans. Cette densité (en prenant une cabine business réduite de moitié par rapport à aujourd'hui, et la suppression de la première classe) pourrait être fixée à 90%. La compagnie aérienne garderait ainsi la liberté d'équiper sa cabine de la façon qui lui importe, mais réduit d'office l'offre "haut de gamme". Aujourd'hui, c'est notamment sur la classe Business que les compagnies aériennes font les plus grandes marges opérationnelles. Aller dans cette direction nécessiterait donc de revoir le business modèle, au moins en partie.

Exemple : si on suppose que pour un Boeing 777, le nombre de siège maximum est de 500, un minimum de 450 sièges est imposé pour la configuration de l'avion opéré.

### Inciter à la limitation de la demande

Les réflexions sur la demande sont détaillées en 7.4. Néanmoins, voici ici quelques idées spécifiques pour limiter la demande de voyages en classe Business :

- **Sensibiliser les passagers** voyageant en business en leur indiquant leur consommation en CO<sub>2</sub>, et peut-être aller jusqu'à différencier les différents sièges business, favorisant les sièges "optimisés" en termes de place et de poids et donc en consommation CO<sub>2</sub>.

- Une bonne part du trafic en classe Affaires a pour motif de voyage "le voyage d'affaire". Ainsi, **une sensibilisation des sociétés** serait utile pour limiter le nombre de voyages de ses collaborateurs, en les encourageant à valoriser la réduction de leur empreinte carbone via une politique sobre quant à l'usage de l'avion. Dans une réflexion de transformation plus globale et plus profonde, il faudrait questionner le modèle organisationnel des activités fortement consommatrices de transport et étudier les pistes pour réduire ce besoin (visio conférence, décentralisation pour être au plus proche des clients, ...). Les sociétés peuvent également inciter les collaborateurs à voyager avec les compagnies ayant les cabines optimisées les plus économes en termes d'émission de CO<sub>2</sub>. Ainsi, les cabines optimisées, à priori moins confortables, deviennent potentiellement un avantage concurrentiel si elles permettent d'attirer les voyageurs d'affaire sur incitation de leur société.

- **Une incitation fiscale** pourrait enfin être imaginée, par exemple en octroyant des crédits d'impôts en cas de réduction de l'empreinte carbone sur les déplacements professionnels d'une année sur l'autre.

Ces idées peuvent sembler difficiles à mettre en place aujourd'hui car l'argument climatique n'est pas déterminant dans l'établissement des contrats de travail, les négociations d'achat de billets, les politiques fiscales. De plus, le voyage en Business est identifié soit comme une nécessité pour les « Road Warriors », soit comme une reconnaissance sociale. Ce type de proposition nécessite donc de modifier ces critères de priorité, de performances, de reconnaissance et de revoir son organisation d'entreprise en fonction. En outre, cela nécessite une révision des PVE (Politique Voyages des Entreprises) et des politiques RH. En particulier pour les « Road Warriors » qui voyagent plus d'une douzaine de fois par an et pour lesquels les conditions de vol rentrent dans les critères de négociations à l'embauche. Pour ces usagers intensifs dont l'activité impose une fréquence de voyage élevée, le maintien d'un confort raisonnable devra être pris en compte lors de l'optimisation de la densité des cabines.

## Impact CO<sub>2</sub><sup>272</sup>

Basé sur l'hypothèse formulée plus haut (réduction de 50% de la business class et suppression de la First), les émissions de CO<sub>2</sub> évitées pour Air France s'élèvent à : **260 ktCO<sub>2</sub> par an sur 5 ans (environ 1% par an), soit 1,3 MtCO<sub>2</sub> au total (entre 2021 et 2025).**

*A noter que si la totalité de l'avion est équipé de sièges "classe Economy", nous gagnerions 2,4 Mt de CO<sub>2</sub> au total entre 2021 et 2025.*

272 Voir détail dans la Note de Calcul

| 2018, MtCO <sub>2</sub>                                                                | Cabine moyenne classique (type AF) | Hypothèse cabine 100% Eco | Hypothèse cabine sans première et -50% de business |
|----------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|---------------------------|----------------------------------------------------|
| Emission CO <sub>2</sub> vols France-International uniquement                          | 17.8 MtCO <sub>2</sub>             | 15.1 MtCO <sub>2</sub>    | 16.3 MtCO <sub>2</sub>                             |
| Emission CO <sub>2</sub> vols France total                                             | 22.6 MtCO <sub>2</sub>             | 19.8 MtCO <sub>2</sub>    | 21.1 MtCO <sub>2</sub>                             |
| Gain de CO <sub>2</sub> par rapport à la cabine classique (international)              |                                    | -15.4%                    | -8.4%                                              |
| Gain de CO <sub>2</sub> par rapport à la cabine classique (international + domestique) |                                    | -12.2%                    | -6.6%                                              |
| Gain de CO <sub>2</sub> par rapport à la cabine classique                              |                                    | -2.7 MtCO <sub>2</sub>    | -1.5 MtCO <sub>2</sub>                             |

Tableau 11 - Gains CO<sub>2</sub> liés à la densification des cabines, périmètre France (DGAC) 2018

En projetant un gain de 6,6% par an du scénario intermédiaire (50% de réduction de la business et suppression de la First) par rapport au scénario de référence (cf. § 7.1), nous pouvons estimer un gain de 87,3 MtCO<sub>2</sub> sur la période 2018-2050.

## Externalités engendrées

Si une loi sur la densification minimale des cabines n'était appliquée qu'au départ de France, elle risquerait de fragiliser les compagnies qui ont leur base en France, car le trafic "business" peut facilement se détourner via d'autres hubs européens pour trouver une offre business plus importante et plus "confortable" (mais bien plus consommatrice de CO<sub>2</sub>). Une telle loi semblerait plus équilibrée si elle était au niveau européen<sup>273</sup>. Néanmoins, le risque est à évaluer avec plus de précision car la rapidité de mise en œuvre est un facteur déterminant du succès des trajectoires climatiques.

Aujourd'hui c'est notamment sur la classe Business que les compagnies aériennes font les plus grandes marges opérationnelles. Ainsi, la perte d'une part de ce trafic oblige à un changement de business model.

Les modifications rapides du nombre de sièges Business versus Eco pour s'adapter au mieux à la demande deviendront peut-

être un avantage concurrentiel certain<sup>274</sup>. L'influence de la demande pour des habitudes de voyage en classe business plus raisonnées pourra également pousser les compagnies à faire voler moins d'avions pour autant de passagers transportés.

Le report des plus gros voyageurs sur le marché de l'aviation d'affaires est enfin un risque qui doit être évalué et maîtrisé, par exemple via une réduction de l'offre sur ce segment par voie réglementaire (voir section 7.3.4).

## 7.3.3 Supprimer l'offre de transport aérien là où l'alternative ferroviaire existante est satisfaisante

### Axe 10 : Supprimer l'offre de transport aérien là où l'alternative ferroviaire existante est satisfaisante<sup>275</sup>

#### Acteurs concernés par la mesure

Compagnies aériennes, Pouvoirs publics

Le transport ferroviaire comporte, en France, un avantage très significatif en raison des très faibles émissions de CO<sub>2</sub> que son utilisation engendre, grâce à une électricité majoritairement décarbonée. **Pour le même trajet, un voyage en train émet en moyenne entre 30 et 40 fois moins de CO<sub>2</sub> qu'un voyage en avion<sup>276</sup>, une fois les infrastructures construites.**

Pour un grand nombre de liaisons aériennes domestiques ou internationales (principalement à destination de pays frontaliers), une alternative ferroviaire acceptable existe. Par « acceptable », nous entendons que l'offre ferroviaire, en plus de desservir des gares situées à proximité des agglomérations ou des zones d'activités, doit permettre de réaliser des trajets dont la durée ou la fréquence peuvent être considérées comme satisfaisantes et comparables à celles du transport aérien (point-à-point). En outre des solutions techniques de réservation « porte à porte » bas carbone, intégrables aux outils de réservation des entreprises (Self-Booking Tools), pourraient être développées et soutenues sans délai.

**Dans ce qui suit, il sera considéré qu'une durée de voyage en train de 4h30 est recevable et acceptable du point de vue des besoins des voyageurs.** Cette limite permet d'intégrer des liaisons aériennes dont l'alternative ferroviaire est convenable, parce que des aménagements ont déjà été faits

<sup>273</sup> Cette mesure est extrêmement contraignante d'un point de vue concurrentiel et ne semble applicable qu'à l'échelle internationale. Par ailleurs, les compagnies adaptent déjà d'elles-mêmes plutôt à la baisse le nombre de sièges First/Business, car la demande est de moins en moins importante - au profit des classes intermédiaires style Premium Eco.

<sup>274</sup> Même si la rationalité côté compagnie veut que l'on fasse voler les avions au maximum de leur temps, donc limiter le temps de grounding et de maintenance. Il est donc peu probable les compagnies s'engagent sur ce type de flexibilité selon la saison car la facture au global sera lourde pour un gain en émission limité. Par ailleurs, tenant compte de l'impact Covid sur le trafic business et du réalisme des entreprises vis-à-vis de leurs dépenses de voyage, il est probable que le nombre de sièges business vendus ne résiste pas longtemps à la vidéo-conférence.

<sup>275</sup> Voyage en train <4h30, facilitation d'accès d'un aéroport pour les correspondances, horaires correspondant aux besoins des voyageurs

<sup>276</sup> En prenant un facteur d'émission de 3,7gCO<sub>2</sub>/p.km pour le TGV et 5,6gCO<sub>2</sub>/p.km (base carbone ADEME) et de 150g/pass.km pour l'avion (référence DGAC).

en ce sens (comme la ligne à grande vitesse sud Europe Atlantique et Bretagne Pays de la Loire), et permet d'intégrer des liaisons européennes.

Il existe en France **36 liaisons** aériennes domestiques pour lesquelles il existe une alternative ferroviaire (grande vitesse ou vitesse conventionnelle) dont la durée de trajet est inférieure à 4h30.

Il existe **11 liaisons internationales** au départ de Paris vers les pays frontaliers pour lesquelles il existe une alternative ferroviaire dont la durée de trajet est inférieure à 4h30.

Il faut distinguer les trajets directs (ou "point à point") et trajets de correspondance (pour rejoindre un "hub" comme Roissy CDG). À ce stade, il est important de préserver les trajets en correspondance, car cela permet de maintenir des vols internationaux sur les "hub" aéroportuaires, en forte compétition les uns avec les autres. Toutefois, si une liaison ferroviaire de moins de 2h30 est disponible pour des trajets en correspondances, la liaison aérienne associée serait suspendue (sauf depuis Nantes et Bordeaux où la liaison en train n'est pas encore satisfaisante jusqu'à CDG du fait d'une trop faible fréquence<sup>277</sup>. Par ailleurs les Bordeaux-CDG directs en train sont généralement au-dessus de 2h30).

Le critère de 4h30 pour le report vers le train peut être considéré comme trop haut, notamment par rapport à la réalité du déplacement professionnel aujourd'hui. Il est en effet au-dessus de la plupart des politiques actuelles de déplacement dans les entreprises. La question de la priorité de l'enjeu climatique est au cœur de cette problématique, mais si l'on se pose la question de qui des politiques de déplacement en entreprise ou de la physique du climat peut le mieux s'adapter à l'autre, la réponse est simple d'un point de vue théorique. Toute la difficulté est dans la mise en œuvre pratique, dans l'acceptation de transformer ses usages et son organisation en profondeur et durablement.

### Capacités ferroviaires actuelles

Bien que l'attribution des sillons sur le réseau ferroviaire français ne soit que de 88%, la saturation observée est principalement due à la demande à certaines heures de pointe, phénomène que les aéroports, ainsi que toutes les infrastructures de transport (aéroports, gares de métro, de RER, périphériques, autoroutes, dessertes des grandes métropoles) connaissent. Ainsi les lignes les plus empruntées se concentrent principalement en région parisienne, et autour de Lyon, nœud ferroviaire notoire. La stratégie de la SNCF en la matière consiste à privilégier la modulation de tarifs (tant au niveau des billets des voyageurs que, et c'est nouveau, sur la tarification des péages) et l'augmentation du nombre de sièges offerts. Une marge de manœuvre visible sur les taux de remplissage qui avoisinent les 67% pour le TGV, 71% pour les lignes internationales, et 44% pour les Intercités, et sur la circulation effective de TGV, a baissé depuis 2015. C'est pourquoi l'indicateur de densité de

la circulation ferroviaire ne permet pas à l'ART<sup>278</sup> de conclure à une saturation du réseau<sup>279</sup>.

Le report des passagers en correspondance (200 000 environ par an<sup>280</sup>) sur la gare TGV de Roissy serait quasiment indolore pour cette structure qui accueille déjà plus de 14 millions de passagers, dont 70% sont des passagers en correspondance. Les nombreuses gares parisiennes (en comptant Massy TGV et MLV-Chessy TGV) ont encore la possibilité d'accueillir les presque 7,5 millions de voyageurs supplémentaires concernés par cette mesure. Rappelons qu'à la suite de l'annonce d'Air France de supprimer les lignes nationales non rentables, le report sur le train est inéluctable. Cela pourrait être renforcé, à plus long terme, par quelques aménagements en gare, comme ceux en cours de réalisation en gare du Nord. Pour Lyon et Marseille une utilisation accrue de la gare TGV de Lyon Saint-Exupéry et d'Aix TGV permettrait de gagner en capacité d'accueil des voyageurs.

La saturation de l'axe Paris-Lyon est en cours de résolution grâce à la mise en place d'une signalisation plus performante, ce qui implique que toute construction de voies supplémentaires n'est pas à envisager pour le report de voyageurs de cette proposition.

La suppression des lignes précédentes, en conservant uniquement les passagers en correspondance, va forcément jouer sur la fréquence des vols, afin d'éviter d'affréter des avions moins remplis sur ces axes. Ce qui pourrait les rendre moins rentables, et indirectement reporter la demande vers du TGV-Air.

### Description détaillée

**Liaisons aériennes domestiques pour lesquelles la liaison est substituable par un trajet en train d'une durée inférieure à 4h30.**

Les liaisons suivantes seraient ainsi suspendues, hors vol en correspondance :

|                          |                         |
|--------------------------|-------------------------|
| PARIS – MARSEILLE        | LYON - RENNES           |
| PARIS – MONTPELLIER      | LYON - STRASBOURG       |
| PARIS - BREST            | LILLE - LYON            |
| PARIS – TOULON           | LYON - METZ/NANCY       |
| PARIS - CLERMONT-FERRAND | MARSEILLE - TOULOUSE    |
| PARIS – BÂLE/MULHOUSE    | LILLE - STRASBOURG      |
| PARIS – LORIENT          | LYON - ROUEN            |
| PARIS - LA ROCHELLE      | LYON - TOULOUSE         |
| PARIS – LIMOGES          | LYON - NANTES           |
| PARIS – TOULOUSE         | LILLE - NANTES          |
| PARIS - BIARRITZ         | BORDEAUX – NANTES       |
| PARIS – PAU              | BORDEAUX - MONTPELLIER  |
| PARIS – QUIMPER          | BORDEAUX – RENNES       |
| PARIS - BORDEAUX         | LYON - MARSEILLE        |
| PARIS - LYON             | LYON - POITIERS         |
| PARIS - NANTES           | PARIS - AGEN            |
| PARIS - BRIVE            | PARIS - LE PUY EN VELAY |

<sup>277</sup> Au-delà des questions de fréquence se posent deux autres problèmes majeurs ; l'efficacité de l'intermodalité et les aspects contractuels de l'offre commerciale. Y répondre nécessite une approche intégrée des solutions de transport.

<sup>278</sup> Autorité de Régulation des Transports, ex-ARAFER (Autorité de régulation des activités ferroviaires et routières)

<sup>279</sup> Le marché français du transport ferroviaire de voyageurs 2017, ARAFER

<sup>280</sup> Une note de calculs jointe à ce rapport explicite l'ensemble des données de la proposition

Certains vols en correspondance, notamment vers Roissy-Charles de Gaulle sont maintenus.

**Les liaisons aériennes internationales au départ de Paris substituables par un trajet en train d'une durée inférieure à 4h30.** Ceci s'appliquerait uniquement aux vols point à point, et les vols de correspondance seraient conservés. Plus précisément, les liaisons suivantes seraient suspendues :

CDG – GATWICK  
CDG – HEATHROW  
CDG – LUTON  
CDG – SOUTHEAD  
CDG – GENÈVE  
CDG – ZÜRICH

CDG – FRANCFORT  
CDG – AMSTERDAM  
CDG – BRUXELLES  
ORY – LONDON CITY  
ORY – GENÈVE

Cette proposition devra faire l'objet de discussion avec les partenaires européens, anglais, et suisses concernés.

Le report sur le train sera acceptable si ce transport se révèle fiable, ce qui implique un travail important à mener sur les raisons des annulations et les retards<sup>281</sup>. D'après les bilans d'ARAFER (maintenant nommée ART), en 2017 et 2018 les causes principales sont d'abord imputables au gestionnaire du réseau puis, hormis la saturation aux heures de pointe, les mouvements sociaux, et pour les Transiliens l'état du matériel roulant. La reprise de la dette de la SNCF va permettre de réaliser des investissements sur les lignes, d'une part, et dans le matériel, d'autre part, qui ne lui étaient plus permis jusque-là.

## Possibilités de mise en œuvre

### Suspension des autorisations d'exploitation des lignes aériennes concernées

L'arrêt d'une liaison aérienne domestique relève de l'autorité administrative chargée de délivrer l'autorisation d'exploitation d'une ligne régulière. Des propositions législatives ont déjà été portées dans ce sens<sup>282</sup>. Dans le cas de l'arrêt d'une liaison aérienne, il importe qu'en parallèle la capacité aéroportuaire sur tous les aéroports concernés soit abaissée d'autant, afin d'éviter que les créneaux aéroportuaires soient attribués à d'autres liaisons, par des compagnies concurrentes le cas échéant.

281 À noter qu'il est très difficile de comparer les retards affichés dans l'aérien et le ferroviaire pour les raisons suivantes :

Raisons structurelles : une dimension pour le train, contre trois pour l'avion. Quand il y a un problème sur une ligne ferroviaire, impossible de dévier le trafic prévu dessus.

Attributions de créneaux : elles se font six mois à l'avance pour le train, trois heures avant dans l'aviation. Ce qui veut dire que les problèmes structurels de saturations sont moins visibles concernant le réseau ferroviaire.

Choix tactiques d'une compagnie : celle-ci peut privilégier une route plus longue, ou un autre niveau de vol, pour partir à l'heure, ce que ne peut pas faire un train. En effet le réseau ferré est plus rigide, et s'adapte moins.

Nombre de passagers transportés : faut-il comparer des pourcentages, le nombre de voyageurs impactés, ou le retard par kilomètre parcouru ? Séparer le réseau transilien du réseau national ? Comparer sur une ligne ? Chaque choix entraîne un biais.

282 Voir la proposition de loi visant à remplacer les vols intérieurs par le train Batho, Panot, Ruffin du 3 juin 2019.

En ce qui concerne la suspension des liaisons aériennes internationales, des précédents existent<sup>283</sup>. Le Parlement néerlandais a fait passer une motion appelant son gouvernement à trouver des accords avec les parties prenantes afin de faire disparaître progressivement les vols Amsterdam-Bruxelles en mars 2019<sup>284</sup>, ce qui concerne au passage la ligne ferroviaire Paris-Amsterdam mentionnée plus bas.

## Impact CO<sub>2</sub>

La suspension de l'exploitation des lignes domestiques hors correspondance listées ci-dessus, permettrait de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> du transport aérien près de **0,7 MtCO<sub>2</sub>** d'ici 2025 soit 30% des émissions du trafic aérien métropolitain (~2,3 MtCO<sub>2</sub> en 2018<sup>285</sup>).

La suspension de l'exploitation des lignes internationales à destination de pays frontaliers listées ci-dessus permettraient de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> du transport aérien près de **70 ktCO<sub>2</sub>** d'ici 2025 soit moins de 1% des émissions du trafic aérien international imputables à la France (~17,9 MtCO<sub>2</sub> en 2018<sup>288</sup>).

**Au regard du périmètre de référence, ce gain représente 3,13% des émissions de 2018 (26,9 Mt CO<sub>2</sub>).** En prenant l'hypothèse que le trafic sur ces lignes évolue de la même façon sur la moyenne du périmètre, nous pouvons en première approximation, considérer que ce gain peut être reporté tous les ans après une montée en puissance progressive jusqu'en 2025. Le gain total sur les émissions cumulées apporté par cette mesure est alors de 41,4 MtCO<sub>2</sub>.

## Externalités

### La diminution du nombre de lignes aériennes domestiques et internationales vers les pays frontaliers engendrerait :

- Une diminution du nombre d'emplois dans les compagnies aériennes françaises.
- Une diminution du nombre d'emplois dans les zones aéroportuaires concernées (personnel de l'aéroport et bassin économique de l'aéroport).
- Un risque de report d'un trajet vers un hub étranger à cause de la détente des temps de correspondance (par exemple un Toulouse-Istanbul-Dehli ou Toulouse-Dubai-Dehli serait peut-être plus long que Toulouse-Londres-Dehli à cause de la correspondance). D'où l'intérêt de gérer ce problème au niveau de l'Union Européenne (+ Royaume-Uni), que ce soit pour les vols en correspondance ou le report modal. Les dernières

283 Les possibilités de mise en œuvre reposent surtout sur une offre de transport pertinente commercialement proposant une offre de transport point à point pour des passagers en correspondance. Autrement le trafic se détournera des opérateurs français vers des opérateurs et des hubs étrangers moins scrupuleux sur les émissions.

284 Voir l'article des Echos du 11/03/2019. Voir également le texte de la motion portée (en néerlandais).

285 Voir [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)

nouvelles à ce sujet sont plutôt encourageantes avec l'annonce du souhait de KLM d'opérer une ligne de train à la place de sa navette entre Schiphol et Bruxelles<sup>286</sup>, à l'instar de la ligne Charles-de-Gaulle - Bruxelles en service depuis plus de vingt ans<sup>287</sup>. Ou encore la récente réunion de 24 pays européens, au sujet du développement du réseau international de train "longue distance" (jusqu'à 800 km)<sup>288</sup>.

#### L'augmentation du nombre de voyageurs sur les lignes ferroviaires entraîne :

- Une légère augmentation du nombre d'emplois sur les lignes et dans les gares.
- Pas de construction de nouvelles lignes, car le taux de remplissage des rames (69% pour les TGV, 44% pour les intercités) est bas à l'heure actuelle.
- Un aménagement réduit des quelques gares qui le nécessitent (comme par exemple la rénovation de la gare du Nord, qui est déjà entamée).

Le réseau ferroviaire et les gares peuvent absorber le surplus de voyageurs, qui est de l'ordre de 9 millions par an, sans construire de nouvelles lignes<sup>289</sup>.

Si l'on considère que à moyen terme les passagers en correspondance pourraient eux aussi être acheminés en train (intermodalité plus efficace et intégrée : billet unique, communication, service de transport de bagage, synchronisation des horaires de train et d'avion, etc...) ; 250 000 tCO<sub>2</sub>/an (sur base 2018) supplémentaires seraient évitées sur les lignes mentionnées (nationales et internationales).

#### Report total ?

Le scénario du report total (toutes les lignes domestiques et augmentation du report des lignes internationales) vers le train n'est pas étudié ici. Un tel scénario nécessiterait des aménagements ferroviaires d'une plus grande ampleur (construction de lignes LGV par exemple). Dans ce cas, il serait nécessaire d'intégrer les émissions liées au chantier de construction de la ligne, comme cela est fait dans les pré-études de ces chantiers. L'opportunité de report du trafic de l'avion vers le train, dans le cas où cela nécessite la construction d'une ligne LGV, doit être étudiée au cas par cas (selon le trafic global et les reports modaux attendus) du point de vue du bilan des émissions, et plus largement du bilan environnemental.

286 <https://www.railtech.com/policy/2019/09/18/trains-will-replace-planes-on-amsterdam-brussels-link/>

287 Mais qui nécessite une logistique particulière et l'«achat» de voitures par Air France.

288 <https://www.euractiv.com/section/railways/news/24-countries-sign-pledge-to-boost-international-rail-routes/>

289 Des nouvelles lignes et aménagements sont planifiés dans le nouveau pacte ferroviaire, la LOM, et le SNIT de 2011, et les aménagements de noeuds ferroviaires dans la région lyonnaise ont fait l'objet d'un débat public

### 7.3.4 Limiter le trafic de l'aviation d'affaire

#### Axe 10 : Limiter le trafic de l'aviation d'affaire

##### Acteurs concernés

Secteur du voyage d'affaire,  
Pouvoirs publics

#### Éléments de contexte

**L'aviation d'affaires désigne la branche du transport aérien consacrée au transport de passagers à la demande dans un but non touristique.** Elle se distingue ainsi de l'aviation civile de lignes régulières et concerne en partie l'usage de «jets privés». Les émissions de CO<sub>2</sub> associées à l'aviation d'affaires à l'échelle mondiale sont estimées à **2%** de celles du secteur aérien<sup>290</sup>, soit **0,4 MtCO<sub>2</sub>** si on extrapole ce chiffre à la France, où l'aviation d'affaires connaît par ailleurs une hausse annuelle de trafic d'environ 4% par an<sup>291</sup>.

En 2017 l'aéroport du Bourget a émis 146 ktCO<sub>2</sub> pour 118 980 passagers transportés, soit 1,24 tCO<sub>2</sub> par passager pour une distance moyenne de vol de 982 km<sup>292</sup>, et une **consommation moyenne d'environ 100 L pour 100km.passager**. En fonction du type d'appareil utilisé et de son remplissage, on peut estimer que l'aviation d'affaires génère entre 3 et 20 fois plus de CO<sub>2</sub> par passager que l'aviation conventionnelle. Au-delà de la problématique de répartition des efforts concernant la réduction de l'empreinte carbone individuelle, avec un tel niveau d'émissions par passager, il est primordial de maîtriser globalement la croissance de ce mode de transport et d'en favoriser toutes les alternatives possibles.

Cette forte émissivité s'explique notamment par une faible occupation de l'espace : en Europe on compte en moyenne 4,7 passagers par vol<sup>293</sup>, et 40% des vols sont même faits sans passagers à bord<sup>294</sup>. Boeing et Airbus commercialisent par exemple des avions d'affaire de type A320 ou B737, qui ne transportent qu'une vingtaine de passagers au plus dans leur version business, contre plus de 150 dans l'aviation commerciale.

#### Description détaillée

##### Report modal et renouvellement de la flotte<sup>295</sup>

En Europe, l'aviation d'affaires permet une réduction moyenne du temps de transport de 125 minutes (46% par rapport à un vol commercial) par vol en moyenne, et dessert

290 <https://nbaa.org/wp-content/uploads/2018/01/business-aviation-fact-book.pdf>

291 <https://actu-aero.fr/2018/01/25/avec-4-de-croissance-en-2017-l-aviation-privee-est-elle-sortie-de-la-crise/>

292 [https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/Emissions\\_gazeusesVF.pdf](https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/Emissions_gazeusesVF.pdf)

293 [https://www.ebaa.org/app/uploads/2018/01/EBAA-Economic-report-2017\\_compressed.pdf](https://www.ebaa.org/app/uploads/2018/01/EBAA-Economic-report-2017_compressed.pdf)

294 <https://www.privatefly.fr/art-de-vivre/les-chiffres-de-l-aviation-privee>

295 Source des données utilisées : [https://www.ebaa.org/app/uploads/2018/01/EBAA-Economic-report-2017\\_compressed.pdf](https://www.ebaa.org/app/uploads/2018/01/EBAA-Economic-report-2017_compressed.pdf)

environ 25 000 liaisons non-opérées par l'aviation commerciale (27% des mouvements se font directement entre ces régions non-desservies). Au sein des 73% de mouvements restants, les vols se faisant entre deux hubs (proportion non-chiffrée) pourraient tout à fait faire l'objet d'un report modal vers les lignes commerciales, divisant ainsi les émissions CO<sub>2</sub> par passager transportés par un facteur 2 à 7 (en fonction du type d'appareil, du remplissage et de la liaison considérées), voire davantage dans les cas où le report modal vers le train est possible. On citera, à titre d'exemple, des liaisons emblématiques telles que Paris-Londres, Nice-Moscou ou Paris-Nice, qui sont très bien desservies par l'aviation commerciale ou le train.

Parmi les autres leviers possibles de réduction des émissions de l'aviation d'affaires, nous citerons également le renouvellement des appareils les plus vieux au profit de turbopropulseurs de dernière génération. Une telle mesure permettrait de maintenir les liaisons vers les régions isolées tout en réduisant les consommations de manière substantielle (cf. 7.2.1.2)

### Contribution de l'aviation d'affaires à l'avènement des technologies de demain

L'utilisation de l'aviation d'affaires reste cependant une solution en l'absence d'alternative, ainsi que pour des usages tels que le transport diplomatique, médical ou militaire (liste non-exhaustive). Dans le cadre de tels usages, l'aviation d'affaires doit favoriser à court-terme le développement et l'industrialisation de technologies plus respectueuses en devenant un laboratoire d'expérimentation et une vitrine pour les concepts innovants développés par la filière (en cohérence avec les programmes de développement à horizon 2035).

### Possibilités de mise en œuvre

1) Obligation de report modal vers le train ou l'aviation commerciale pour les trajets les mieux desservis, hors usages justifiés (gouvernement, diplomatie, médical, militaire, etc.).

2) Incitation forte à l'usage d'avions technologiquement en rupture (hydrogène, propulsion hybride, appareils court-courrier à faible capacité passagère) pour les vols restants.

3) Taxation / compensation de l'aviation privée sur la base des émissions CO<sub>2</sub> et/ou taxation pour les vols non-conformes aux points ci-dessus.

### OU (plus radical/moins facilement acceptable)

4) Interdiction pure et simple de l'aviation privée hors usages justifiés.

### Impact CO<sub>2</sub>

Le périmètre de l'aviation d'affaire n'est pas inclus dans le périmètre de l'aviation commerciale étudié dans ce rapport. Néanmoins, au vu des émissions par passager.km et des taux de croissance, il est important de traiter du sujet du transport aérien d'affaire.

A titre d'information l'arrêt de l'aviation d'affaire contribuerait à une baisse de **2% des émissions sur le périmètre global, soit environ 0,4 MtCO<sub>2</sub>**.

### Externalités

#### Emploi

La diminution forte de l'aviation d'affaire en France engendrerait :

- Une diminution du nombre d'emplois (personnel navigant, commercial, pilotes, compagnies aériennes exploitant ces lignes) ;
- Diminution du nombre d'emplois dans les zones aéroportuaires concernées (personnel de l'aéroport et bassin économique de l'aéroport). La réduction substantielle du nombre de vols d'affaires sur le territoire français impacte très fortement des aéroports tels que le Paris Le Bourget ou Nice Côte d'Azur, qui comptent parmi les principaux hubs européens en matière d'aviation d'affaires, et représentent environ 6 000 emplois directs, indirects et induits<sup>296</sup> ;
- Une diminution du nombre d'emplois chez les constructeurs en proportion de leur part de marché pour l'aviation d'affaires en France.

Parmi les pistes de pérennisation des d'emplois de ce secteur, on citera notamment :

- Le développement des compétences de maintenance propres aux avions à propulsion hybrides électriques et à hydrogène.
- L'hébergement d'entreprises innovantes et de leurs activités d'essais en vol, de certification.
- La création d'une offre d'aviation d'affaires intra-Europe bas carbone au départ de la France : les aéroports français bénéficiant d'un avantage géographique au sein de l'Europe.

#### Impact pour les usagers

Report modal : diminution de la flexibilité des vols, augmentation du temps de transport.

296 [https://www.ebaa.org/app/uploads/2018/01/EBAA-Economic-report-2017\\_compressed.pdf](https://www.ebaa.org/app/uploads/2018/01/EBAA-Economic-report-2017_compressed.pdf)

## 7.3.5 Repenser le système de miles

### Axe 11 : Repenser le système de miles

#### Acteurs concernés

Secteur du voyage d'affaire,  
Pouvoirs publics

#### Éléments de contexte

Les systèmes de fidélité par miles récompensent les voyageurs fréquents. Ces miles sont stockés sur un compte et utilisés à 80% par le voyageur pour effectuer "gratuitement" des voyages à titre personnel et ainsi augmentent les émissions, le plus souvent par effet d'aubaine. Les voyageurs en classe affaire et hyper fréquents collectent un nombre très fortement majoré de miles.

Par ailleurs les compagnies aériennes ont développé des accords avec des acteurs tiers comme American Express qui font gagner des miles pour tout achat de la vie courante, accentuant encore cet effet d'aubaine.

Comptablement, au niveau d'Air France seulement, le stock de miles représente une "dette" de la compagnie de 720M€. Chaque année, 300M€ sont comptablement consommés mais **ils représentent surtout plus de 5% du trafic total en Passager.km du groupe Air France-KLM et donc des émissions de CO<sub>2</sub>.**

La notion de miles n'existe pas dans les compagnies low-costs.

Au niveau global, le stock de miles est de 30 Trillions, soit l'équivalent des émissions annuelles de plusieurs compagnies comme Air France-KLM s'ils étaient consommés.

#### Description détaillée

L'objectif serait de diminuer significativement les vols réalisés par pur effet d'aubaine et d'inciter à utiliser les miles pour financer la décarbonation du transport aérien par exemple.

#### Possibilités de mise en œuvre

- Proposer systématiquement aux voyageurs de ne pas recevoir leurs miles et de les transformer soit en compensation carbone, soit en dons pour des ONG ou en don pour de la R&D pour une aéronautique moins carbonée (aujourd'hui les dons sont possibles mais pas du tout mis en avant).
- Dans un second temps, organiser l'interopérabilité des programmes de fidélité avec le ferroviaire et proposer d'utiliser les miles aérien dans le secteur ferroviaire. Interdire la commercialisation de miles auprès d'acteurs tiers (cartes AMERICAN EXPRESS, etc.).
- Appliquer une surprime de 20% sur les billets miles comme une taxe carbone (au moment de la réservation), ce qui revient à réduire de 20% la valeur CO<sub>2</sub> du stock de miles et tous les billets miles à venir.

- Diminuer le nombre de miles gagnés en classe affaire (par exemple, le voyageur en classe affaire gagnerait le même nombre de miles qu'en classe économie au lieu de 4 à 6 fois comme c'est souvent le cas).

- Interdire l'usage à titre personnel de miles collectés par un voyage professionnel (ou a minima, mettre en place une imposition d'avantages en nature pouvant être fléchée vers la décarbonation du secteur aérien).

Une approche plus radicale serait de supprimer complètement le système de miles. Les compagnies Low Cost à titre d'exemple fonctionnent sans.

#### Impact CO<sub>2</sub>

Sur les 16.2 Mt de CO<sub>2</sub> émises par les opérations aériennes d'Air France en 2019, 5% sont produites par des billets Miles<sup>297</sup>, soit presque 1Mt de CO<sub>2</sub>, et 50% au moins d'entre eux sont des voyages supplémentaires issus d'un effet d'aubaine qui n'auraient pas été réalisés sans miles.

On peut considérer qu'en baissant de 85% les miles utilisés par les mesures proposées (hors suppression complète, cf. note de calcul), **on peut réduire les émissions d'Air France de 0.34 MtCO<sub>2</sub> par an (hors amont).**

Les effets pourraient être relativement immédiats.

#### Externalités

##### Emploi

Impact emploi lié à 2,5% de trafic en moins (cf. 9)

##### Concurrence

Les systèmes de fidélisation font partie intégrante du business model des compagnies aériennes. Ces systèmes apportent une connaissance approfondie des clients et des données décisionnelles, en temps réel, permettant de diffuser des offres marketing plus pertinentes. Il est au cœur des alliances aériennes (Skyteam par exemple). Le rapport aux miles pour certains utilisateurs est fusionnel. Le système de miles peut être perçu comme un critère important de choix d'une compagnie aérienne. Comme souvent dans le transport aérien, une harmonisation internationale la plus large possible de la législation sur ce sujet serait bien sûr souhaitable. Néanmoins, dans une dynamique de changement de paradigme global et de besoin de réduction massif, orienter un premier pas de sobriété vers les vols de pure opportunité reste une piste à pousser au maximum, à toutes les échelles de gouvernance.

## 7.3.6 Conclusion

Ces propositions ont pour effet de diminuer le trafic, donc les émissions. D'un point de vue méthodologique, nous devons les appliquer en premier, les mesures d'amélioration techniques s'appliquant alors sur une assiette d'émissions diminuée.

<sup>297</sup> <https://www.mckinsey.com/industries/travel-transport-and-logistics/our-insights/miles-ahead-how-to-improve-airline-customer-loyalty-programs>

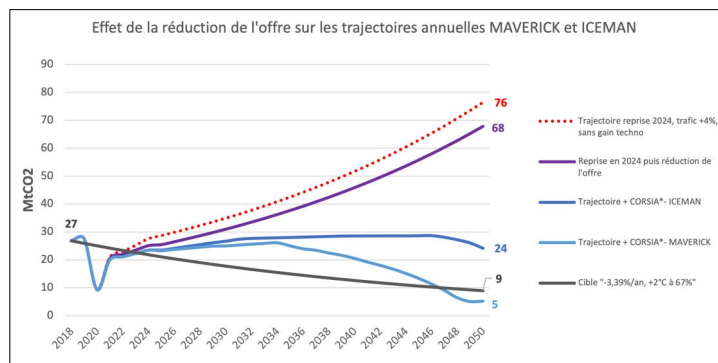


Figure 51 – Réduction de l'offre et trajectoires annuelles « MAVERICK » et « ICEMAN » - France

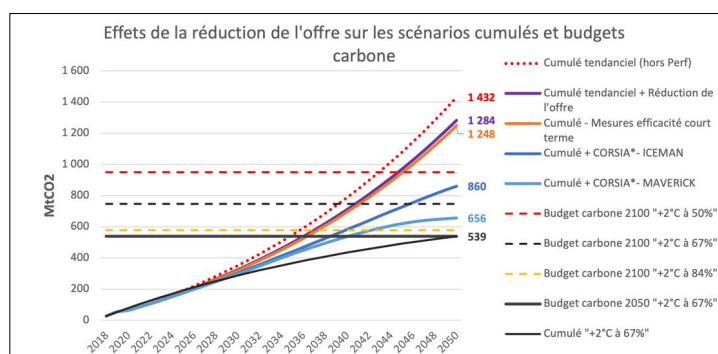


Figure 52 – Émissions cumulées avec réduction d'offre 2 scénarios et budgets carbone France

Les mesures d'adaptation de l'offre permettent une première inflexion visible sur les trajectoires et ont un effet significatif sur les émissions cumulées (-10%) car elles sont appliquées à très court terme (entre 2021 et 2025). Associées aux mesures techniques court terme, elles permettent de « gagner » environ 1 an sur le moment d'atteinte du budget.

Elles correspondent à un trafic réduit de 11,2% par rapport à la courbe de croissance de 4%/an.

Dans cette hypothèse :

- Le scénario « MAVERICK » arrive en-deçà de la cible 2050 de la trajectoire « -3,39%/an » avec un besoin en électricité bas carbone diminué de 11% (235 TWh, soit environ 7 fois le parc éolien français 2019).
- Le scénario « ICEMAN » est toujours très loin de l'objectif de décarbonation. En revanche, la quantité de CO<sub>2</sub> à compenser a chuté de 68% pour passer à 30 MtCO<sub>2</sub> et le besoin d'électricité bas carbone ne chute que de 4 % (135 TWh, soit environ 4 fois le parc éolien français 2019) car la quantité de PTL consommée reste stable, plafonnée à la limite de production.

Dans les 2 cas, le niveau de sobriété apporté par ces mesures d'adaptation de l'offre ne permet toujours pas de rester dans le budget.

**Le budget 2018-2050 est atteint autour de 2038 et, dans le scénario « ICEMAN », le budget carbone total disponible entre 2018 et 2100 est atteint autour de 2046. Ceci signi-**

**fie que, dans cette hypothèse, la seule option pour rester sous les « +2°C » avec 67% de chance à horizon 2100 est d'arrêter net le trafic à partir de 2046.**

Dans la suite du rapport, nous regardons les hypothèses de trafic et les options permettant d'éviter ce scénario catastrophe et leurs conséquences sur les emplois.

## 7.4 Proposition de pistes complémentaires pour rester dans le budget carbone

### 7.4.1 Introduction

Le scénario exposé ci-dessus ne permettant pas de réduire suffisamment les émissions de l'aérien pour rester dans le budget carbone avec un niveau de risque acceptable, **la nécessité d'organiser la modération du trafic s'impose** (cf. 7.2.4).

Cette option n'a rien d'une décision facile, et sa mise en œuvre sera d'autant plus douloureuse que l'anticipation sera faible, comme est aujourd'hui douloureux le coup d'arrêt brutal que subit le secteur du fait de la pandémie du COVID. Là encore, des choix sociétaux seront nécessaires, pour déterminer la place et le rôle que nous souhaitons pour le transport aérien.

**Faire le pari inverse, celui de la croissance et du progrès technique comme levier exclusif de la réduction des émissions, n'est factuellement pas raisonnable :**

1. Alors que le temps joue contre nous, la piste de l'innovation technique exclusive est un pari plus qu'incertain sur l'avenir, et dans tous les cas trop tardif, alors que la sobriété est applicable dès aujourd'hui de manière certaine.
2. Les deux options ne sont pas exclusives. La réduction du trafic peut être préférée à court terme, en attendant l'éventuel développement d'une énergie bas-carbone abondante. À noter que dans ce cas, les nécessaires investissements auxquels le secteur doit consentir ne pourront donc être financés par la croissance. Une intervention de l'État sera nécessaire, dans la continuité du plan de sauvetage de l'aéronautique présenté en juin 2020 (cf. 5.10) et à plus large échelle à travers le plan de relance de l'économie française.
3. Si l'option 1 échoue, c'est toute une industrie qui s'écroulera de manière très brutale et subie, alors que la réduction du trafic permet d'organiser une transition douce et planifiée, notamment en termes d'emplois.
4. Se donner la possibilité de faire décroître le trafic de manière contrôlée est dans tous les cas un moyen de pallier les risques de retard dans la mise en place d'une stratégie de décarbonation. À titre d'illustration théorique, tout projet de baisse des émissions aligné sur une diminution de 5% par an, produit 5% d'émissions cumulées supplémentaires par année de retard dans sa mise en œuvre. En d'autres termes, pour une année donnée, si tous les leviers technologiques conjugués ne permettent pas d'atteindre les 5% de réduction annuelle des émissions, il est possible de les ac-

compagner d'une réduction de trafic correspondant à la partie manquante pour respecter cet objectif. En ce sens, la réduction du trafic aérien est la seule mesure permettant de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> du secteur aérien de manière certaine.

5. Le contrôle du trafic permet de réduire les possibilités d'effet rebond et introduit la possibilité d'une planification à long terme de la décroissance des émissions du transport aérien.

**En outre, la modération du trafic passager et, par conséquence, celle des émissions globales liées à ce dernier, présentent deux avantages:**

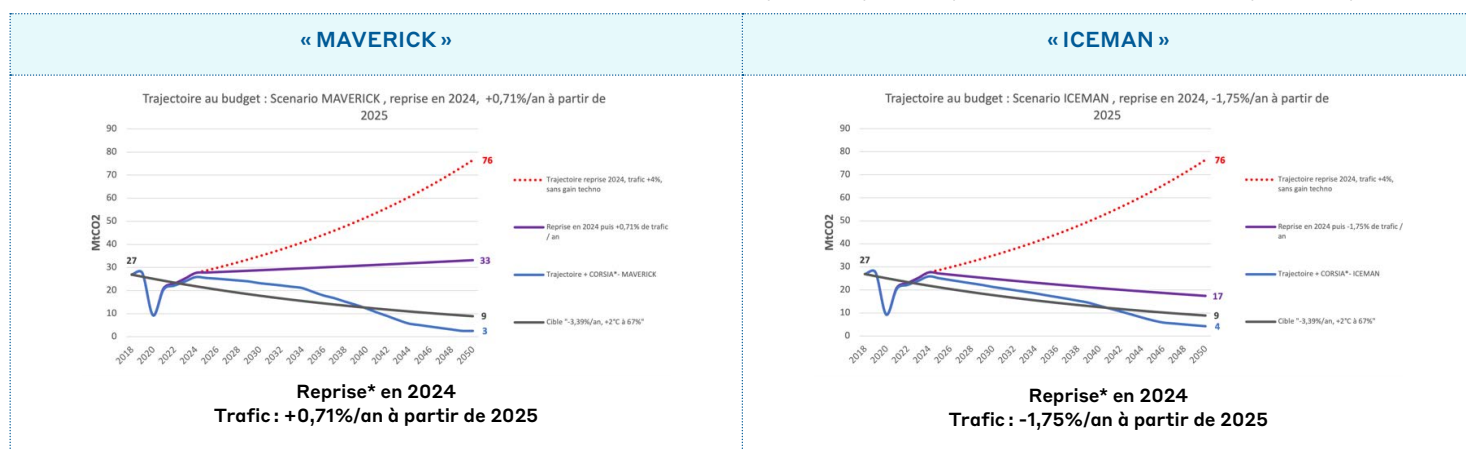
1. Modération des effets hors CO<sub>2</sub> par effet de levier sur le court terme du fait d'une trajectoire d'émissions globalement décroissante.
2. Fluidification des opérations avec la possibilité par exemple, pour le contrôle, de mieux optimiser les trajectoires (quand le trafic est faible les trajectoires directes sont plus nombreuses, typiquement de nuit à l'heure actuelle), à condition que d'autres usagers ne réservent pas les espaces vacants (comme les militaires par exemple).

Pour se rendre compte de l'effort supplémentaire de sobriété nécessaire, nous avons ajusté l'hypothèse de croissance de trafic à partir de 2025 sur les 2 scénarios afin de rester dans le budget carbone (cf. tableau 12, ci-dessous).

Dans la suite de cette section, nous proposons quelques pistes de réflexion pour organiser une éventuelle baisse du trafic si ce levier d'action s'avérait nécessaire. Nous souhaitons avant tout ouvrir ici une réflexion publique sur ce sujet et ne prétendons nullement détenir l'exhaustivité des solutions. Notre analyse se décline selon les 3 axes conventionnellement étudiés par les politiques de mise en œuvre de la sobriété :

1. Informer et sensibiliser les parties prenantes.
2. Mener une réflexion citoyenne sur le rôle de l'avion, la priorisation des usages et les possibilités de choix alternatifs de consommation.
3. Dresser un premier inventaire des leviers réglementaires.

**Tableau 12 - 2 scénarios respectant le budget carbone France**



\* par « Reprise », nous entendons ici « Retour au niveau de trafic de 2019 »

## 7.4.2 Informer et sensibiliser les parties prenantes à hauteur des enjeux

### Informer et sensibiliser les parties prenantes à hauteur des enjeux

#### Acteurs concernés

Le grand public, les consommateurs, les dirigeants du secteur aéronautique (compagnies aériennes, industriels, etc.), les décideurs politiques, administratifs ou économiques au niveau local, régional ou national.

### Éléments de contexte

La sensibilisation des acteurs et la mise à disposition d'informations factuelles et exhaustives sur l'impact environnemental des produits et services, sont des leviers fondamentaux de transformation des habitudes et des comportements, comme l'indique la Convention Citoyenne pour le Climat dans son rapport final.

Ces leviers sont applicables au transport aérien considéré ici comme un service, ainsi qu'au secteur aéronautique, en les orientant vers plusieurs typologies de parties prenantes allant du grand public aux consommateurs et futurs consommateurs de voyages, en passant par les décideurs politiques et administratifs (au niveau local, régional et national). Il sera largement préférable, pour des raisons d'équité comme d'efficacité, de généraliser l'ensemble de ces mesures au secteur du transport en général. Ceci permettra à la fois de comparer les différents modes de transport sur la base d'une information similaire et factuelle sans induire de biais de sur- ou sous-information d'un transport à un autre.

À ce jour, les mises en œuvre qui en sont faites les rendent malgré tout peu efficaces, comme le montrent les constats énoncés ci-après. Le maintien de ce statu quo paraît s'opposer à l'atteinte des objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre poursuivi par la France : il ne permettra pas aux parties prenantes concernées de prendre pleinement

conscience des impacts environnementaux des choix effectués et des décisions prises en lien avec le transport aérien ou le secteur aéronautique.

Dans la suite, les constats sont faits sur le périmètre du transport aérien, mais les mesures sont proposées pour l'ensemble du secteur du transport longues distances (aérien, automobile, ferroviaire, maritime, ...), le transport aérien tirant ainsi vers le haut le secteur du transport en matière d'information et sensibilisation.

**Constat 1 : il n'existe pas à l'heure actuelle de campagnes de sensibilisation diffusées et organisées à grande échelle par l'état à destination du grand public, présentant de manière factuelle et indépendante de tout groupe de pression, les enjeux, chiffres et impacts climatiques associés au transport aérien.**

Une infographie de vulgarisation<sup>298</sup> réalisée en partenariat avec l'État français, l'ADEME et le Réseau Action Climat, est bien accessible sur le site de l'ADEME, mais on peut toutefois se poser la question de sa diffusion au-delà du cercle des personnes se sentant concernées (et l'ayant trouvée). Elle présente des informations plutôt complètes et des données à jour, ce qui permet de replacer le transport aérien dans le contexte historique, d'analyser son développement et de présenter les efforts des industriels du secteur pour réduire les émissions de ce moyen de transport. Elle donne à chacun des perspectives, dans le contexte post COVID, ou pour réduire les émissions de gaz à effets de serre lors de ses voyages.

D'autres éléments d'information peuvent également être trouvés en ligne, mais leur consultation reste là aussi à l'initiative des personnes intéressées ou préoccupées par le sujet. De plus, ces éléments sont pour la plupart produits par des groupes d'influence : ils présentent en général le sujet de manière très orientée, pour promouvoir, en prenant deux extrêmes, soit le développement du transport aérien (exemple du site réalisé par l'ATAG, l'Air Transport Action Group), soit son arrêt quasi total (exemple du site réalisé par le réseau Stay Grounded).

**Constat 2 : on peut s'interroger sur l'exhaustivité et l'indépendance des informations transmises aux décideurs politiques et administratifs en amont de leurs prises de décisions en lien avec le transport aérien et l'aéronautique, ainsi que sur la profondeur de leur niveau de sensibilisation.**

Cette question rejoint les éléments déjà décrits au sujet de la sensibilisation du grand public, en mettant ici l'accent sur un niveau de détail et de documentation plus poussé concernant les impacts climatiques locaux, nationaux, économiques et sociaux associés au transport aérien et au secteur aéronautique. Une analyse du plan de soutien au secteur aéronautique déclenchée par l'État en juin 2020 a été réalisée par le collectif Supaero-Décarbo. Cette analyse soulève plusieurs problèmes, notamment l'utilisation d'expressions non valables scientifiquement (par exemple : « un avion zéro émission de CO<sub>2</sub> »), l'absence d'objectifs chiffrés et échelonnés dans le temps et le fait que ce plan a été principalement élaboré par le GIFAS

et sera piloté par ce dernier. Au-delà, l'absence de mention explicite de l'implication de scientifiques, climatologues, sociologues et citoyens, tous parties prenantes sur le sujet, indique une asymétrie dans l'élaboration du plan de relance du secteur, là où la prise en compte d'avis plus larges aurait entraîné une plus grande neutralité.

**Constat 3 : de nombreux outils en ligne permettent de réaliser l'évaluation de l'empreinte carbone d'un trajet en avion mais fournissent des résultats hétérogènes et difficilement interprétables par leurs utilisateurs ou le grand public sans sensibilisation préalable.**

On peut citer par exemple le calculateur carbone de l'OACI, de la Direction Générale de l'Aviation Civile (DGAC), les calculateurs Atmosfair, MyClimate.org, Good Planet, qui utilisent des méthodologies d'estimation différentes, parfois complexes.

Pour estimer la consommation de kérosène, ils utilisent en général la moyenne des consommations relevées sur l'ensemble des types d'avions utilisés sur le trajet spécifié à date, réactualisée régulièrement notamment pour les calculateurs OACI, DGAC et Atmosfair. Ce dernier offre un niveau de détail supplémentaire en permettant de spécifier de manière optionnelle le type d'avion. Seuls certains calculateurs permettent de spécifier la classe utilisée par le passager pour le vol (économique, business, first...) et peuvent ainsi mieux prendre en compte la surconsommation associée aux classes les plus élevées (calculateur OACI et Atmosfair). Des calculateurs prennent en compte la partie amont (production et distribution du kérosène), d'autres non. Plusieurs affichent même directement les effets hors CO<sub>2</sub> (NOx, traînées de condensation...) dans leurs estimations, sans mentionner toutefois les incertitudes actuelles dans la compréhension fine des effets hors CO<sub>2</sub> (cf. §5.7.2) et la difficulté de les intégrer avec un indice de confiance fort dans l'estimation de l'empreinte carbone d'un vol (on peut noter par ailleurs que ces calculateurs intégrant les effets hors CO<sub>2</sub> sont adossés à des organisations proposant des offres commerciales permettant de compenser les émissions de gaz à effet de serre associées à un vol). D'autres n'intègrent pas ces effets (calculateurs OACI et DGAC) ce qui conduit à une sous-estimation de l'impact climatique d'un vol, les études scientifiques réalisées depuis une vingtaine d'années sur ce sujet montrant en effet que la contribution des effets hors CO<sub>2</sub> au forçage radiatif induit par le transport aérien est globalement du même ordre que celle du CO<sub>2</sub> (cf. §5.7).

Les utilisateurs sont ainsi confrontés, en fonction du calculateur utilisé, à des estimations sensiblement différentes pour un même vol, associées à des incertitudes parfois très importantes mais non visibles. Enfin, l'accès au détail des estimations obtenues, a fortiori à des éléments d'explication compréhensibles sans sensibilisation approfondie, est souvent difficile, voire impossible, sur les sites internet concernés. Cela ne permet donc pas aux utilisateurs de pouvoir interpréter correctement les résultats obtenus et de prendre des décisions en toute connaissance de cause concernant le choix de l'avion comme mode de déplacement.

298 [https://multimedia.ademe.fr/infographies/infographie\\_vacances/](https://multimedia.ademe.fr/infographies/infographie_vacances/)

**Constat 4 : l'information mise à disposition des consommateurs sur l'empreinte carbone de leurs voyages en avion est peu visible et difficilement exploitable lorsqu'ils achètent leurs billets sur les sites d'opérateurs de voyage ou de compagnies aériennes.**

Depuis 2013, en France, les prestataires de transports, de voyageurs comme de marchandises, doivent informer chaque bénéficiaire de la quantité de gaz à effet de serre émise du voyage demandé. Limité initialement au CO<sub>2</sub>, l'ensemble des gaz à effet de serre est désormais couvert depuis 2017. La méthodologie de calcul réglementaire utilisée en France est basée sur le projet de norme européenne relatif au calcul et à la déclaration d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre des prestations de transport (NF EN 16258). Elle prend en compte les émissions de la partie amont (production et distribution du kérosène) mais n'intègre pas les effets hors CO<sub>2</sub>.

Cependant, cette information sur l'empreinte carbone du voyage que le consommateur souhaite réaliser est souvent difficilement accessible en amont de la décision d'achat : ce dernier a besoin de parcourir en profondeur les sites internet des opérateurs de voyages ou des compagnies aériennes pour identifier précisément cette information, qui, généralement, est affichée en petits caractères. De plus, certaines compagnies aériennes n'offrent qu'un détail de calcul limité.

Enfin de nombreux opérateurs de voyage ou des compagnies aériennes mentionnent désormais que certains de leurs vols sont intégralement compensés. Cette information peut donc laisser croire au passager que l'impact climatique de son voyage sera nul, ce qui l'induirait en erreur s'il n'est pas sensibilisé au préalable aux principes de la compensation carbone, aux risques et aux questions que posent ces mécanismes (cf. 5.6 et 6.4)

**Constat 5 : les futurs consommateurs de voyages subissent de nombreuses incitations asymétriques à prendre l'avion, tout au long du processus qui les guide jusqu'à la décision finale d'achat de leurs billets.**

Les campagnes publicitaires pour les compagnies aériennes, ou les opérateurs de voyages, jouent principalement sur l'affichage de tarifs de billets d'avion peu élevés. Elles tendent à favoriser la consommation de services toujours plus accessibles (notamment depuis l'émergence forte des compagnies low-costs sur le marché) et, au-delà, contribuent à accroître le trafic aérien, donc son impact climatique. Si les données et les études publiques manquent pour mesurer l'effet de ces campagnes sur l'augmentation du trafic aérien, celui-ci n'est a priori pas négligeable, au vu des importants investissements publicitaires réalisés en France chaque année. Toutefois, de telles incitations, quel que soit leur support, ne sont en aucune façon nuancées ou mises en regard des impacts climatiques du transport aérien.

De plus, lors de l'achat de billets d'avions, des messages sont affichés sur les sites internet de réservation, en cas d'un faible nombre de places restantes pour un tarif donné (par exemple : « 3 personnes consultent ce vol et il ne reste que 2 places à ce tarif »). Cette pression publicitaire, dont la vente de biens et services en ligne tous secteurs confondus est coutumière, peut amener à précipiter un achat, sans prendre en compte un impact autre que financier.

## Description détaillée des mesures proposées

Les mesures décrites ci-dessous tentent de répondre aux constats énoncés précédemment et de dépasser le statu quo actuel. Elles complètent notamment plusieurs propositions de la Convention Citoyenne pour le Climat, en les déclinant au transport longue distance.

Si elles sont ici prévues pour être applicables sur le territoire national pour l'ensemble des acteurs concernés (y compris les entreprises étrangères opérant sur le sol national ou proposant des voyages à la vente à partir du territoire national), elles n'ont de sens que dans un contexte européen voire mondial, sans quoi l'effet escompté sera gommé par une distorsion de concurrence ou des reports de trafic à l'international.

**Mesure 1 : Développer des ressources pédagogiques sur les enjeux climatiques, techniques et économiques du transport aérien, du secteur aéronautique et du transport longues distances en général, allant de la sensibilisation grand public à des sensibilisations plus poussées, puis systématiser des cursus éducatifs associés.**

Ces ressources pédagogiques devront être conçues au travers de collaborations entre des collectifs citoyens indépendants des groupes de pression, des sociologues, des formateurs, des spécialistes du transport longues distances (aérien, ferroviaire, maritime, automobile, autocars, etc.), des industriels du secteur, des scientifiques et des spécialistes de la communication. Elles devront être validées par des experts indépendants (selon le principe de revue par des pairs). Elles auront plusieurs cibles, du grand public jusqu'à des populations déjà sensibilisées, en passant par les acteurs gouvernementaux et élus locaux ou nationaux. Elles devront être régulièrement mises à jour en fonction de l'évolution des connaissances et du contexte.

Chacun devra être en mesure de comprendre les informations et cela passera par la mise en place d'un cursus éducatif à tous les niveaux et à tous les stades de la vie personnelle ou professionnelle (comme proposé par la Convention Citoyenne pour le Climat dans les propositions C5.1 à C5.3 de son rapport final). Il sera également intéressant de rendre obligatoire ce cursus pour l'ensemble des élus et des agents nationaux et territoriaux concernés par le transport longues distances et de déployer des formations internes qui s'en inspirent pour tous les salariés des sociétés du secteur du transport longues distances.

**Mesure 2 : Créer et promouvoir un portail public officiel du secteur du transport longues distances, à destination du grand public, des entreprises de transport, des élus et des administrations puis lancer des campagnes d'information régulières et de grande portée sur l'existence de ce portail.**

Ce portail devra être porté par une agence ou un organisme étatique (par exemple : l'ADEME ou le CESE). Il hébergera en première priorité les ressources pédagogiques « officielles » (voir mesure 1 ci-dessus) et facilitera l'accès au calculateur de référence de l'empreinte carbone d'un voyage selon le moyen de transport (voir mesure 3 ci-dessous). Il devra

également faire le lien vers toutes les ressources réglementaires, les différentes pages pertinentes des sites internet des agences étatiques et ministères ainsi qu'à des informations et statistiques locales et nationales, en open-data, avec capacité de visualisations dynamiques. Sa mise à disposition devra être associée à des campagnes régulières d'information grand public multisupports, à forte portée.

### Mesure 3 :

Réviser la réglementation associée à l'article L1431-3 du code des transports (articles D1431-1 à D1431-19) et le guide méthodologique associé fourni par l'ADEME afin que l'information GES des prestations de transport en avion tienne compte des effets hors CO<sub>2</sub> en complément des phases amont et de fonctionnement déjà couvertes par la réglementation, de la classe de siège et du modèle d'avion (hors cas particuliers décrits dans les articles D1431-16 à 18). Étendre cette vision globale des impacts à tous les moyens de transport longues distances selon leur spécificité.

**Une documentation complète et des supports de vulgarisation à destination du grand public devront être rendus disponibles et facilement accessibles.** La méthodologie de calcul devra être tenue régulièrement à jour pour tenir compte de l'évolution de l'état de l'art des connaissances sur l'impact climatique du transport (aérien, ferroviaire, maritime, etc.), et être validée par un comité indépendant d'experts scientifiques. La méthode révisée devra faire l'objet d'un amendement de la norme européenne relative au calcul et à la déclaration d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre des prestations de transport (NF EN 16258).

En ce qui concerne l'aérien, la prise en compte obligatoire de la classe de siège est nécessaire, du fait du plus fort impact carbone des classes de sièges supérieures. La prise en compte de la consommation moyenne de carburant réalisée par une compagnie aérienne avec les différents modèles d'avion qu'elle utilise sur les lignes qu'elle dessert permettra de valoriser les progrès opérationnels réalisés par la compagnie. Elle favorisera ainsi le renouvellement des appareils d'ancienne génération.

**Mesure 4 : Mettre à disposition du public et des entreprises de prestations de transport longue distance un calculateur officiel de l'empreinte carbone d'un voyage pour tout type de moyen de transport, open-source et open-data, donnant accès au total équivalent CO<sub>2</sub> avec affichage des incertitudes associées. En ce qui concerne l'aérien, il devra tenir compte de la classe de siège considérée, intégrer les émissions de la combustion, de l'amont, ainsi que l'équivalent carbone des effets hors-CO<sub>2</sub>.**

Il devra servir de référence en France pour l'information GES des prestations de transport. Les résultats fournis devront pouvoir servir de sources de données de niveau 1 pour l'empreinte carbone associée à un trajet donné, s'inscrivant ainsi dans le cadre défini par la proposition C1.1 en page 18 du Rapport Final de la Convention Citoyenne pour le Climat<sup>13</sup> et de la réglementation de l'article L1431-3 du Code des Transports<sup>15</sup>.

Pour l'aérien, ce calculateur pourra être issu de la mise à jour du calculateur TARMAAC de la DGAC. Il devra permettre de

spécifier la classe de siège (et de façon optionnelle le modèle d'avion). Les données utilisées, les hypothèses, paramètres et détails du calcul devront être affichables facilement à la demande des utilisateurs, de manière à favoriser la transparence, l'objectivité des résultats et la sensibilisation du grand public. Les incertitudes devront être clairement mentionnées sous forme d'intervalles de valeurs équivalent CO<sub>2</sub> minimum et maximum (indice de confiance à 90%).

Il devra afficher de façon graphique, quand cela est pertinent, une comparaison entre les émissions de gaz à effet de serre des différents moyens transports, comme on peut par exemple le voir sur la section « Se déplacer » du comparateur Ecolab de l'ADEME, ainsi que le pourcentage de consommation du budget carbone individuel compatible avec les Accords de Paris (environ 2 tCO<sub>2</sub>e) que représente la valeur obtenue.

Il doit pouvoir être personnalisé par les transporteurs et les industriels du transport en utilisant leurs données propres, à des fins d'affichage comparatif avec les résultats standards pour valoriser les progrès techniques et opérationnels des acteurs du secteur. Dans ces cas précis d'utilisation, les données utilisées doivent être principalement basées sur l'expérience constatée. Si elles correspondent à des cas d'usages optimum très rarement atteints, cela doit être explicitement mentionné et l'utilisation des résultats à des fins d'affichage réglementaire est dans ce cas interdite. À titre d'exemple dans l'aérien, si la flotte Air-France est plus performante et moins émissive que celle de ses concurrents, cela doit pouvoir être valorisé auprès du grand public en minimisant le risque de contestation.

**Mesure 5 : Renforcer par voie réglementaire les obligations d'affichage par les prestataires de transports de la quantité de gaz à effet de serre émise pour tous les trajets, sur tous les supports publicitaires associés ou lors des opérations d'achat de billets de transport par les consommateurs, sous la forme d'un CO<sub>2</sub>-Score.**

Cette proposition nécessite à minima une révision des articles D1431-2 et D1431-20 à D1432-21 de la réglementation associée à l'article L1431-3 du Code des Transports. Elle décline, pour le secteur du transport, des éléments issus des propositions C1.1 et C2.3 élaborées par la Convention Citoyenne pour le Climat et présentées en détail respectivement en page 18 et en page 26 de son rapport final<sup>13</sup>. Elle devra s'appliquer pour tout billet de transport longues distances quel que soit son point de départ et de destination (modification nécessaire de l'article D1431-2 de la réglementation associée à l'article L1431-3 du Code des Transports).

Le CO<sub>2</sub>-Score reprend le vocable utilisé dans la mesure C1.1 de la Convention Citoyenne pour le Climat. Il est défini ici comme étant l'affichage des émissions équivalent CO<sub>2</sub> d'un trajet longue distance en utilisant une charte graphique obligatoire définie par réglementation (taille minimale relative par rapport au support, visibilité par rapport au tarif de la prestation, proportions, cartouche, couleurs, polices de caractères...). Il devra intégrer, sous forme graphique, la proportion du budget carbone individuel annuel compatible avec les accords de Paris, consommée par la valeur affichée.

Chaque prestataire de transport devra utiliser ce CO<sub>2</sub>-Score pour afficher l'information de la quantité de gaz à effet de serre émise pour tout trajet longue distance proposé, calculée selon la méthode réglementaire définie dans la mesure 3. Les effets d'éventuelles mesures de compensation carbone mises en œuvre par le prestataire ne devront pas être soustraits du total affiché dans le CO<sub>2</sub>-Score. Le prestataire pourra toutefois mentionner une contribution, liée au trajet considéré, favorisant l'augmentation des puits de carbone terrestres, dans le cadre exclusif de projets bénéficiant du Label Bas Carbone et à condition que la taille de cette mention soit inférieure à la taille du CO<sub>2</sub>-Score.

Lors des opérations d'achat par un consommateur, le CO<sub>2</sub>-Score associé au voyage concerné devra être disponible dès l'obtention des résultats d'une recherche de billets. L'information devra être mise en contexte, si possible sous forme graphique ou d'un message du type : « *L'empreinte carbone de ce voyage représente x % du budget carbone annuel et individuel compatible avec l'objectif de l'Accord de Paris* ». Le CO<sub>2</sub>-Score et sa mise en contexte devront également être visibles et faire l'objet d'une confirmation de lecture par le consommateur, pour autoriser le lancement des opérations de paiement.

Les transporteurs pourront, à titre de comparaison, afficher le CO<sub>2</sub>-Score standard obtenu à partir du calculateur officiel pour un trajet donné, afin de valoriser leurs progrès techniques et opérationnels sur le trajet considéré. Un transporteur utilisant ce double affichage pour un vol donné devra toutefois le généraliser pour l'ensemble des trajets qu'elle propose à la vente, afin d'éviter d'éventuelles distorsions de concurrence.

**Mesure 6 : Réguler la publicité sur les voyages pour limiter les incitations non-choisies à la consommation ou la promotion des voyages aux CO<sub>2</sub>-scores les plus élevés et afficher de manière obligatoire une mention incitant à consommer les voyages de manière raisonnée sur tous les supports publicitaires concernés.**

Cette mesure est une déclinaison au transport longue distance des propositions C2.1, C2.2 et C2.3 élaborées par la Convention Citoyenne pour le Climat et présentées en détail sur les pages 25 à 27 de son rapport final<sup>13</sup>. Elle est prévue en plusieurs étapes à partir de 2023.

A partir de cette date, toutes les publicités associées à des trajets longues distances devront comporter une mention lisible ou audible incitant à consommer les voyages de manière raisonnée, en plus du CO<sub>2</sub>-Score proposé dans la mesure 5. La durée du trajet, si elle est mentionnée, devra être calculée sur la base du temps moyen passé par un voyageur en incluant les temps en gare, aéroport, gare maritime, et non sur la base du seul temps de trajet.

Enfin, après fixation par décret en Conseil d'État du niveau seuil de CO<sub>2</sub>-Score au-delà duquel l'impact environnemental d'un trajet sera jugé excessif, les voyages dont les CO<sub>2</sub>-Scores dépassent ce seuil seront soumis à l'interdiction de toute publicité, quels qu'en soient les supports (télévision, radio, papier, internet et panneaux physiques, téléphone et SMS, mails, etc.), à l'exception des exclusions définies par la loi Evin I.

## Impact CO<sub>2</sub>

Ces mesures visent à introduire un usage raisonné de l'avion pour les voyages et entraîner des réflexions approfondies de moyen et long terme lors des choix d'investissements par les décideurs politiques, administratifs ou économiques. Leur effet sur la réduction des émissions de gaz à effet de serre est difficile à évaluer. À court terme, l'effet de ces mesures sera faible. Cependant, **les changements de comportements et les modifications d'investissements ou de politiques locales induites à moyen et long terme rendront ces leviers de plus en plus efficaces et entraîneront des réductions vraisemblablement importantes.**

## Externalités engendrées

L'application de ces mesures devrait permettre de stabiliser ou ralentir la croissance en volume du trafic aérien (domestique et international au départ de la France) et de stabiliser les investissements en termes d'extensions ou de nouvelles constructions d'infrastructures aéroportuaires, a minima sur le territoire français. Pour éviter toute distorsion de concurrence ou des reports de trafic à l'international, il est recommandé de transposer ces mesures dans la réglementation européenne et de les appliquer sur tout le territoire de l'Union Européenne.

Leur mise en œuvre entraînera en France un besoin d'emplois et de budgets complémentaires au sein des ministères et agences étatiques à impliquer (Ministère de la Transition écologique, Ministère des Transports, Ministère de l'Éducation nationale, de la Jeunesse et des Sports, ADEME, CITEPA, DGAC, etc.). Elle demandera de plus une coordination poussée entre plusieurs acteurs non étatiques, génératrice d'emplois. Elle entraînera également des besoins en ressources et emplois, pour élaborer les ressources pédagogiques liés aux problématiques environnementales du transport aérien, mettre en œuvre les formations à tous les niveaux (de l'école primaire aux plus hautes instances), réaliser des analyses de cycle de vie ou d'impacts environnementaux dans leur globalité.

Les entreprises concernées du secteur du tourisme ou du transport auront besoin de changer leurs méthodes de calcul d'empreinte carbone des voyages, de mettre en place le CO<sub>2</sub>-Score et de modifier leurs systèmes de réservation de voyages et leurs habitudes publicitaires, ce qui entraînera des investissements à réaliser mais aussi des gisements de mobilité interne.

De plus, la régulation des publicités aura un impact fort dans les départements marketing et communication de ces entreprises, ainsi que dans les agences publicitaires ou de communication spécialisées dans ce type de publicités ayant une forte part de leur activité en France. Elle aura vraisemblablement un impact plus faible sur l'emploi dans le secteur de la publicité non spécialisée (agences de communication, acteurs, modèles, banque d'images, etc.). Enfin, elle entraînera potentiellement une perte de revenus pour les diffuseurs de publicités (télévision, presse, sites internet, etc.).

Les conséquences sur l'emploi dans les entreprises concernées ne sont donc pas à négliger : elles nécessiteront des besoins en mobilité professionnelle, départs non contraints ou reconversions professionnelles et un subventionnement de l'État pour augmenter leur acceptabilité. La baisse des dépenses pour les entreprises payant actuellement pour ce type de publicité en France pourra cependant permettre de financer une partie de la reconversion des salariés concernés vers les gisements d'emplois identifiés dans cette section.

### 7.4.3 Organiser collectivement la priorisation des usages

#### Organiser collectivement la priorisation des usages

##### Acteurs concernés

Le grand public, les consommateurs, les décideurs politiques.

##### Constats

Les usages de l'avion sont très divers, et une réflexion de fond sur ce point est indispensable pour organiser une diminution consentie par tous de la demande de transport aérien.

**Les vols pour motifs professionnels représentent 28% de la demande de transport aérien en 2016<sup>299</sup> et une partie d'entre eux sont remplaçables par une visioconférence.** On peut imaginer dans un premier temps de conserver les rencontres physiques et donc les voyages professionnels pour les occasions les plus importantes (démarches commerciales, signature de contrats / partenariats stratégiques, conférences scientifiques les plus importantes, chercheurs invités, activité de conseil ne pouvant justifier l'impossibilité de dépêcher un expert local...). La version préliminaire du Plan de transformation de l'économie française du *Shift Project* prévoit que le développement des visioconférences permette une réduction des kilomètres parcourus de 25% pour les motifs professionnels, soit 15 milliards de voyageurs.km en 2050<sup>300</sup>.

La crise de la COVID-19 a ici joué le rôle d'un accélérateur, en permettant une prise de conscience de la forte substituabilité de la solution numérique et en augmentant l'acceptabilité d'une telle mesure par la population. Par ailleurs, la relocalisation souhaitable d'autres activités (également pour des raisons écologiques) aidera à diminuer le besoin de déplacements ou à rendre d'autres moyens de transports compétitifs. Les entreprises peuvent ici avoir l'occasion de jouer un rôle de pionnières en la matière en standardisant une politique de déplacements professionnels adaptée à la contrainte climatique, bien qu'une réglementation sera certainement nécessaire pour universaliser cette pratique.

**Les vols de vacances et loisirs (un peu moins de 48%<sup>301</sup>) font partie des usages qui étaient jusqu'ici en forte dynamique de développement, principalement parmi la classe moyenne, dans laquelle il a tendance à se normaliser.** La publicité véhicule des messages associant le voyage vers une destination lointaine à une évasion du quotidien, à une déconnexion bien méritée. L'émergence de nouveaux comportements du type *Bucket List* (liste de choses à faire avant de mourir)<sup>302</sup> ou *F.O.M.O.* (*Fear Of Missing out* - crainte de passer à côté de quelque chose)<sup>303</sup> accroissent la demande de transport aérien. On note même l'apparition d'un petit nombre de personnes passant la majorité de leur temps à voyager et promouvant ce mode de vie sur les blogs et réseaux sociaux<sup>304</sup>.

Dans quelle mesure le transport aérien, seul moyen de transport permettant aujourd'hui l'interconnexion de longue distance entre les cultures et les peuples, est-il partiellement détourné de cet honorable objectif par une offre abondante et une publicité parfois agressive<sup>305</sup> ? Quel est ce désir d'évasion et de déplacement auquel répond aujourd'hui l'usage extensif du transport aérien à des fins de loisirs ? La question mérite d'être posée, quand Deutsche Bahn affirme avoir augmenté ses revenus de 24% grâce à une campagne ciblant les Instagrammeurs<sup>306</sup>, dans laquelle sont comparées des photographies de destinations lointaines avec celles, très ressemblantes, de régions accessibles en train pour moins cher. Par ailleurs, quel est le lien entre l'offre de transport aérien à bas coût et le tourisme de masse dont l'impact sur les destinations visitées (uniformisation, bétonisation, gentrification<sup>307</sup>) et l'utilité socio-économique au regard de son empreinte carbone sont des plus en plus questionnés<sup>308</sup> ?

Même dans le pire cas où l'efficacité énergétique du transport aérien ne parviendrait plus à croître, une réduction de 50 % du nombre de passagers.kilomètres français par rapport à l'année 2017 ramènerait ce nombre au niveau de 1998<sup>309</sup>. Cette époque, pas si lointaine, était-elle pour autant synonyme de privation dans nos désirs d'exploration, de culture et de découverte d'autrui ? Limiter l'usage du transport aérien dans une proportion compatible avec un objectif de sobriété éner-

301 [https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/ENPA\\_2015\\_2016.pdf](https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/ENPA_2015_2016.pdf)

302 Voir par exemple <https://www.passeportsante.net/fr/psychologie/Fiche.aspx?doc=bucket-list-idees>

303 Voir par exemple <https://www.fomotraveler.com/>. Arte a par ailleurs consacré une émission à cette "mouvance" : <https://www.youtube.com/watch?v=Z5Us9snCMD4>

304 Voir par exemple <https://www.iustonewayticket.com/i-want-to-travel-for-the-rest-of-my-life-travel-bloggers-tell-how-to-do-it/>, <https://www.forbes.com/sites/celinnedacosta/2016/11/29/how-these-6-millennials-travel-the-world-for-a-living/#424571ae2443> ou <https://www.salonblogueursvoyage.fr/>.

305 <https://blogs.letemps.ch/pascal-kuemmerling/2018/08/04/compagnies-aeriennes-la-bataille-des-pubs-sexy/>

306 <https://arts.konbini.com/instagram/lieux-plus-instagrammables-version-low-cost/>

307 [https://www.francetvinfo.fr/decouverte/vacances/cinq-preuves-que-le-tourisme-de-masse-est-une-plaie\\_2403100.html](https://www.francetvinfo.fr/decouverte/vacances/cinq-preuves-que-le-tourisme-de-masse-est-une-plaie_2403100.html)

308 <https://www.lumni.fr/article/tourisme-de-masse-quels-avantages-et-quels-inconvenients> et <https://www.vie-publique.fr/eclairage/24088-le-surtourisme-quel-impact-sur-les-villes-et-sur-lenvironnement>

309 Source 2017 : bulletin de statistiques du trafic aérien commercial en France en 2017 de la DGAC (376 milliards de PKT) Source 1998 : MTEs <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/trafic-en-passagers-kilometres-transportes-30381934/>

299 [https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/ENPA\\_2015\\_2016.pdf](https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/ENPA_2015_2016.pdf)

300 État d'avancement du Plan de transformation de l'économie française (PTEF) - Mobilité longue distance, The Shift Project, juillet 2020

gétique implique-t-il donc un renoncement total aux échanges nécessaires au maintien d'un tissu social à l'échelle mondiale ?

**Enfin, 21% des vols répondent à un besoin de rendre visite à des proches.** Même s'il est a priori difficile d'imaginer restreindre ce type d'usage, il est probable que la demande pour ce type de déplacement décroisse à long terme si le trafic aérien se voit contraint, dissuadant mécaniquement les candidats à l'expatriation choisie<sup>310</sup>.

## Pistes de réflexion

**Nous sommes favorables à l'organisation d'un choix collectif et démocratique des usages que nous souhaitons réduire prioritairement versus ceux que nous entendons a contrario conserver.** Si nous ne le faisons pas, cela reviendra de facto à une priorisation des usages résultant de mesures restrictives mises en place par la puissance publique (évolution des prix, contraintes faites aux particuliers et aux professionnels, etc.). Au contraire, un accord collectif sur les usages prioritaires est garant d'une meilleure acceptabilité de l'évolution du secteur et des mesures à prendre en ce sens. Nous présentons quelques pistes de réflexion pour organiser la priorisation des usages, sans prétendre détenir la vérité et sans présager non plus des mesures techniques qui permettraient d'atteindre cette répartition, dans l'objectif de contribuer à l'ouverture du débat public sur ces questions.

Encourager à la sobriété d'usage nécessite une compréhension fine de notre demande de transport aérien. Le terme sobriété, désormais inscrit dans la loi de transition énergétique de 2015<sup>311</sup>, désigne ici le fait de modérer les usages intenses en énergie sans pour autant nécessairement y renoncer totalement. Si elle s'oppose à la surconsommation excessive (au sens où celle-ci n'est pas compatible avec les objectifs climatiques) elle n'est pas pour autant synonyme d'abstinence.

**La sobriété énergétique n'est pas une démarche négative de renoncement à des consommations indispensables mais au contraire une réduction, par une hiérarchisation des besoins, des consommations superflues.** Elle traduit simplement la nécessité pour notre consommation de trouver des limites dans un monde aux ressources finies. La question fondamentale est ici de savoir quelle instance est légitime pour hiérarchiser les besoins. Encore une fois, nous défendons l'idée que la priorisation n'est acceptable pour les usagers que si elle est établie par un collectif qui les représente. Ce dernier peut être porté par les entreprises comme par l'état, qui peut agir seul ou déléguer une partie de cette mission à des regroupements citoyens<sup>312</sup>.

## Ce que peuvent faire les entreprises

Les entreprises du monde entier tentent d'améliorer leurs performances environnementales et communiquent d'ailleurs

publiquement sur ces sujets. En rendant compte de leurs émissions, en agissant sur plusieurs facettes du développement durable de leurs opérations, les organisations peuvent tirer des bénéfices comme par exemple réduire leurs coûts, agir directement sur le bien-être et la satisfaction de ses employés, faire preuve de leadership et contribuer à un changement sociétal positif. La réputation de l'entreprise auprès du public et surtout des investisseurs s'en voit ainsi améliorée.

Quelle que soit leur destination, les voyages d'affaires coûtent cher à l'entreprise. À même itinéraire, un voyage d'affaires coûte en moyenne deux fois et demie plus cher qu'un voyage de loisirs<sup>313</sup>. Selon le cabinet *Key Corporate Solutions* ils représenteraient entre 0,8 et 1,8 % du budget total des entreprises. Le transport, qu'il soit en avion, en train ou en ferry, est le premier poste de dépenses et représente la moitié du budget de voyages d'affaires d'une entreprise<sup>314</sup>.

Une rationalisation des dépenses peut toutefois conduire à des réductions de 15 à 18 % de son budget voyage. Cet effort est en général confié à un groupe de travail dédié, impliquant les achats, la direction financière, les ressources humaines et les salariés. Pourquoi dès lors ne pas y rattacher la direction RSE<sup>315</sup> afin d'inclure des critères environnementaux dans la mise en œuvre d'une politique de mobilité longue distance ? Plutôt que de ne chercher qu'à optimiser les coûts de voyages considérés comme inéluctables, cette instance pourrait également définir les conditions selon lesquelles voyager est dispensable, et réfléchir à la mise en place d'alternatives moins onéreuses et à moindre impact environnemental. Cette piste de réflexion s'inscrit dans la continuité de la proposition D1 de la Convention Citoyenne pour le Climat<sup>316</sup>, qui propose d'*impliquer les entreprises et les administrations pour penser et mieux organiser les déplacements de leurs salariés ou agents*, mais en l'étendant à la mobilité longue distance.

La crise du COVID-19 a poussé de nombreuses entreprises à changer de position par rapport au télétravail. Le secteur tertiaire, qui compte 67% des emplois en France<sup>317</sup>, gagnerait incontestablement à s'inspirer des méthodes et outils de travail mis en place de longue date par des entreprises fortement distribuées dans lesquelles le travail à domicile est la règle<sup>318</sup>.

313 <https://blog.fairjungle.com/pourquoi-le-voyage-daffaires-vous-co%C3%BBte-beaucoup-trop-cher-eacd210b5ca4>

314 <http://www.journaldunet.com/management/0606/0606138voyages-affaires.shtml>

315 La direction RSE se penche déjà sur la question. En général, les émissions CO<sub>2</sub> liées aux voyages d'affaires ne sont pas comptabilisées dans les rapports annuels d'entreprise. En effet, les données présentées sont exprimées selon le périmètre d'activité et la méthodologie définis par le Green-House Gas Protocol (GHG Protocol). Or les émissions liées aux déplacements professionnels relèvent du scope 3 facultatif, en opposition aux scope 1 et 2 obligatoires. Ainsi, en 2020 il est non obligatoire pour une entreprise de rendre compte des émissions liées aux voyages d'affaires. De ce fait, les efforts pour monitorer et réduire les émissions liées aux déplacements professionnels - au moins jusqu'à la pandémie COVID-19 - se sont appuyés sur l'action volontaire des organisations, avec leurs propres outils et méthodes de calculs.

316 <https://propositions.conventioncitoyennepourleclimat.fr/pdf/pr/cce-sedeplacer-impliquer-les-entreprises-et-les-administrations-pour-penser-et-mieux-organiser-les-deplacements-de-leurs-salaries-ou-agents.pdf>

317 <https://www.insee.fr/fr/statistiques/4277675?sommaire=4318291>

318 <https://medium.com/swlh/a-remote-work-retrospective-three-years-in-56e52ada55d5>

310 Sans remettre en question le rôle absolument fondamental du transport aérien dans les échanges internationaux, nous défendons ici simplement l'idée que si le transport aérien est à l'avenir contraint, les candidats à l'expatriation seront moins nombreux.

311 LOI n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte. <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORF-TEXT000031044385/>

312

Développer une véritable culture de collaboration à distance doit permettre de questionner la pertinence des déplacements. Cette approche permet par exemple à certains acteurs du numérique de démarcher leurs prospects sans les rencontrer, en misant sur des vidéos de démonstration personnalisées.

Bien évidemment, il ne s'agit pas ici d'affirmer que le contact humain est superflu dans la sphère professionnelle. Difficile par exemple d'imaginer les acteurs du consulting exercer leur métier loin de leurs clients. Mais ne peut-on dans ce cas favoriser l'embauche de collaborateurs locaux pouvant se rendre chez les clients via un service de mobilité du quotidien bas-carbone ? Quitte à encourager le *coworking* pour éviter un surcoût induit de structure ?

Pour les entreprises spécialisées dans le *Travel management*<sup>319</sup>, réduire la consommation de transport aérien est également une opportunité de diversification. Plutôt que de vendre un déplacement au meilleur coût, pourquoi ne pas proposer en complément un service de conseil pour évaluer au mieux, dans un contexte donné, la pertinence - économique et écologique - des déplacements ? Et en profiter pour former les salariés d'une entreprise aux outils et méthodes modernes de collaboration à distance ? La modération du transport aérien aujourd'hui imposée par les contraintes sanitaires incite d'ores-et-déjà le *travel management* à se remettre en question. Nous pensons qu'à l'avenir le rôle du *travel manager* sera avant tout celui d'un facilitateur de collaboration plus qu'un organisateur de voyage.

Sujet corollaire, le besoin de prendre l'avion pour rejoindre un séminaire, une session de team building, un voyage du Comité d'Entreprise, doit être questionné, et nul doute que l'entreprise responsable peut inventer d'autres dispositifs, quitte à miser sur des événements locaux simultanés en cas de fortes disparités géographiques.

Toutes ces actions pourront être valorisées par les entreprises dans le cadre de la mise en place d'un processus d'amélioration continue sur le management environnemental, dont la certification ISO 14001 fait justement l'objet, et à laquelle les consommateurs sont de plus en plus sensibles<sup>320</sup>.

### Ce que peut faire l'État

Parmi les mesures incitatives que peut prendre l'État, une première possibilité serait d'inclure un volet dédié au transport aérien dans le Plan de mobilité. Anciennement appelé le Plan de déplacements d'entreprise (PDE), le Plan de mobilité (PDM), obligatoire pour les entreprises de plus de 100 salariés, est un ensemble de mesures qui vise à optimiser et augmenter l'efficacité des déplacements des salariés d'une entreprise, pour diminuer les émissions polluantes, réduire le trafic routier et favoriser l'usage des modes de transport alternatifs à la voiture individuelle<sup>321</sup>. En étendant le périmètre du Plan à la mobilité longue distance, l'État pourrait choisir de conditionner le soutien technique et financier de l'ADEME à l'établissement de mesures incitant les entreprises à ré-

duire leur usage de l'avion. À noter qu'une solution d'accompagnement à la mise en place du télétravail devra également être pensée pour les petites structures qui ne disposent pas nécessairement de ressources à consacrer à la recherche de solutions innovantes.

L'État peut également aller plus loin pour encourager le développement du télétravail depuis des lieux communs plutôt que depuis le domicile des salariés, et pas uniquement dans les zones urbaines ou de moyenne densité. Le télétravail, souvent utilisé comme un moyen de réduire la demande de mobilité quotidienne, peut aussi avoir un impact sur la demande de mobilité longue distance, puisqu'une personne rompue aux outils et méthodes qu'exige la distance peut collaborer indifféremment avec des personnes à quelques kilomètres de chez elles comme à l'autre bout de la planète, modulo évidemment les contraintes du décalage horaire. L'État reconnaît déjà que les espaces de travail partagés ou de « *co-working* » représentent une alternative aux organisations traditionnelles du travail, en mutualisant les ressources et en créant un tissu collaboratif entre les personnes qui y travaillent, qui ne sont ainsi pas isolées. Ce soutien doit s'amplifier tout en renforçant l'équilibre démographique du territoire : si la moitié de l'offre des espaces de *coworking* se concentre en Île-de-France, l'État a un rôle à jouer dans le soutien aux tiers-lieux, écovillages et autres initiatives rurales qui ont aussi pour effet de réinvestir des zones jusqu'alors désertées.

L'État peut aussi faciliter la mise en place de solutions souvent préconisées à l'échelle individuelle, comme par exemple le fait de prendre l'avion moins souvent en contrepartie d'une durée de séjour plus longue. Un moyen d'encourager ce type d'initiative serait par exemple de rendre le Compte épargne-temps<sup>322</sup> obligatoire pour tous les salariés, afin de permettre à ces derniers une plus grande souplesse dans leur prise de congés.

Enfin et peut-être surtout, l'État gagnerait à s'entourer d'un collectif citoyen des usagers du transport aérien afin de s'assurer que les politiques incitant à un report sur les usages les moins énergétiques du transport soient réellement alignés sur les attentes des citoyens. Il s'agit ici encore une fois de reprendre la proposition D3 de la Convention Citoyenne pour le Climat, qui propose d'*inclure les citoyens dans la gouvernance des mobilités au niveau local comme au niveau national*<sup>323</sup>, en l'étendant à l'échelle de la mobilité longue distance. Les outils de consultation citoyenne mis à disposition pour le secrétariat général pour la modernisation de l'action publique ne manquent pas<sup>324</sup>. On privilégiera toutefois les dispositifs permettant aux citoyens désignés de recevoir au préalable de la consultation une instruction suffisante. C'est par exemple le cas de la conférence de citoyens, dont les membres sont formés par des experts et fournissent ainsi un avis éclairé construit collectivement, qui vient appuyer la décision publique et limite les contestations.

322 <https://www.service-public.fr/particuliers/vosdroits/F1907#:~:text=La%20mise%20en%20place%20d,pas%20oblig%C3%A9%20de%20l'utiliser.>

323 <https://propositions.conventioncitoyennepourleclimat.fr/pdf/pr/ccc-sedeplacer-inclure-des-citoyens-dans-la-gouvernance-des-mobilités-au-niveau-local-come-au-niveau-national.pdf>

324 <https://www.modernisation.gouv.fr/sites/default/files/fichiers-attaches/boite-outils-demarches-participation.pdf>

319 [https://fr.wikipedia.org/wiki/Travel\\_manager](https://fr.wikipedia.org/wiki/Travel_manager)

320 <https://www.iso.org/fr/iso-14001-environmental-management.html>

321 <https://www.ademe.fr/entreprises-monde-agricole/reduire-impacts/optimiser-mobilite-salaries/dossier/plan-mobilite/plan-mobilite-quest-cest>

## 7.4.4 Éléments de réflexion sur les leviers réglementaires

Plusieurs pistes sont possibles pour réduire le nombre de passagers en agissant par voie réglementaire, à des échelles allant de la mesure nationale à la mesure européenne voire mondiale. Bien évidemment, l'efficacité des mesures est directement liée à son périmètre géographique d'application, une juridiction coercitive locale n'ayant pour effet que de transférer les usagers vers les pays limitrophes.

Nous proposons ici une liste de leviers réglementaires, et tentons pour chacun d'entre eux d'en estimer le niveau d'acceptabilité, la difficulté de mise en œuvre, les contournements possibles et les externalités associées. Encore une fois, nous ne prétendons pas à l'exhaustivité. Notre but est avant tout d'amorcer un débat citoyen et de permettre une hiérarchisation des usages qui fasse consensus.

| Restriction progressive des créneaux       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|--------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Effet escompté                             | Diminution du nombre de vols et de survols sur le territoire et/ou le bloc d'espace aérien associé.                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Acceptabilité des citoyens                 | Moyenne.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Acceptabilité du secteur                   | Faible.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Difficulté de mise en œuvre                | Les textes européens doivent être modifiés pour les survols, alors que la raison environnementale est suffisante pour la limitation des créneaux aéroportuaires. La mesure nécessitera également d'arbitrer entre les compagnies sur l'attribution des créneaux et de gérer la concurrence (AF refusant de céder ses créneaux à Emirates par exemple). |
| Contournement possible (dont effet rebond) | Vols évitant le ciel français ou le bloc d'espace Europe-centre. Augmentation de taille des appareils.                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Externalités                               | Diminution d'activités dans les aéroports, et donc perte d'emplois.                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Commentaires                               | La mesure peut être assouplie par un seuil d'émission par kilomètre, ce qui laisserait le créneau ouvert pour un avion futur suffisamment sobre.                                                                                                                                                                                                       |

| Supprimer la contrainte d'occupation à 80% des créneaux |                                                                                                                                                                                                                                               |
|---------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Effet escompté                                          | Les compagnies ajustent leurs vols à la demande réelle et pas à la nécessité de conserver leurs créneaux. Cela permettra d'éviter de voir voler des avions peu remplis, donc économiquement et écologiquement non pertinents <sup>325</sup> . |
| Acceptabilité des citoyens                              | Très bonne.                                                                                                                                                                                                                                   |
| Acceptabilité du secteur                                | Bonne pour les compagnies disposant déjà de créneaux.                                                                                                                                                                                         |

|                                            |                                                                                                                                                                                   |
|--------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Difficulté de mise en œuvre                | Problème de concurrence, car cela bloque les nouveaux entrants si les créneaux non utilisés ne sont pas disponibles. Implique une refonte en profondeur du système d'attribution. |
| Contournement possible (dont effet rebond) | Mise en place de nouvelles règles d'attribution pour l'occupation des créneaux délaissés.                                                                                         |
| Externalités                               | Revenus fluctuants pour les aéroports et les PSNA (prestataires des services de la navigation aérienne).                                                                          |

| Restriction progressive du nombre de passagers sur les lignes |                                                                                                                                                                                    |
|---------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Effet escompté                                                | Diminution de la fréquence des vols.                                                                                                                                               |
| Acceptabilité des citoyens                                    | Faible, surtout si augmentation des prix en conséquence.                                                                                                                           |
| Acceptabilité du secteur                                      | Faible.                                                                                                                                                                            |
| Difficulté de mise en œuvre                                   | Assez facile, jouer sur les créneaux aéroportuaires qui ont une composante d'accueil passagers, et procéder de même pour l'ensemble des survols, à capacité d'emport des aéronefs. |
| Contournement possible (dont effet rebond)                    | Doit être élargi au périmètre européen pour avoir un impact suffisant, et éviter le déversement des passagers vers des pays limitrophes.                                           |
| Externalités                                                  | Report potentiel d'une partie du trafic passager sur le train si existant, ou sur la voiture.                                                                                      |

| Taxe kérosène                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|--------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Effet escompté                             | Incitation à consommer moins de carburant.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Acceptabilité des citoyens                 | Bonne, l'opinion publique est globalement favorable.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Acceptabilité du secteur                   | Faible.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Difficulté de mise en œuvre                | Un vote unanime des 191 États membres de l'OACI serait indispensable à toute remise en question de la Convention de Chicago. Néanmoins, ce dernier n'a pour vocation que de régir les vols internationaux, et il serait ainsi possible pour l'exécutif d'instaurer la TICPE sur le carburant des avions pour les vols domestiques. Par ailleurs, une résistance du secteur au motif que la taxe fait potentiellement double emploi avec CORSIA ou EU-ETS est à anticiper. |
| Contournement possible (dont effet rebond) | Fuel tankering si la mise en place est réduite à un seul État. Devient intéressante sur plusieurs blocs d'espace, à l'échelle d'un continent.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Externalités                               | Report de l'augmentation sur le prix des billets. Inégalités sociales accentuées. Redistribution possible dans la décarbonation.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |

<sup>325</sup> Cette mesure est d'ailleurs une demande du secteur lui-même en période de pandémie. Voir <https://www.air-cosmos.com/article/adaptation-crneaux-horaires-les-aeroports-et-les-compagnies-tombent-daccord-23540>

| Taxe passagers                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Effet escompté</b>              | Diminution du trafic.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| <b>Acceptabilité des citoyens</b>  | Faible. Peut renforcer l'aspect socialement injuste, sauf progressivité en fonction du nombre de voyages ou de la distance parcourue <sup>326</sup> .                                                                                                                                                                                                                                                    |
| <b>Acceptabilité du secteur</b>    | A priori bonne, puisqu'il s'agit d'une taxe à la consommation, donc sans impact sur les marges des compagnies aériennes, même si le but reste évidemment de dissuader la consommation.                                                                                                                                                                                                                   |
| <b>Difficulté de mise en œuvre</b> | Taxe a priori régressive (inégalités sociales accentuées, sauf si elle s'applique de manière progressive), peut être perçue comme l'achat d'un droit à polluer. Le montant de la taxe doit être réellement dissuasif (et donc la taxe sera difficilement acceptée), et l'argent collecté doit être affecté de manière transparente à des investissements auxquels les citoyens adhèrent <sup>327</sup> . |
| <b>Externalités</b>                | Redistribution possible dans la décarbonation.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |

| Encadrement des subventions aux compagnies aériennes |                                                                                                                                           |
|------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Effet escompté</b>                                | Les compagnies low-cost réduisent leur activité. Baisse des dessertes sur les aéroports peu rentables.                                    |
| <b>Acceptabilité des citoyens</b>                    | Bonne.                                                                                                                                    |
| <b>Acceptabilité du secteur</b>                      | Très bonne pour les compagnies régulières.                                                                                                |
| <b>Difficulté de mise en œuvre</b>                   | Proposition à l'étude par l'Union Européenne <sup>328</sup> .                                                                             |
| <b>Contournement possible (dont effet rebond)</b>    | Fuel tankering si la mise en place réduite à un seul État. Devient intéressante sur plusieurs blocs d'espace, à l'échelle d'un continent. |
| <b>Externalités</b>                                  | Peut affaiblir les aéroports déjà peu rentables.                                                                                          |

| Encadrement des subventions aux aéroports         |                                                                                                                     |
|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Effet escompté</b>                             | Les aéroports non rentables ferment.                                                                                |
| <b>Acceptabilité des citoyens</b>                 | Bonne.                                                                                                              |
| <b>Acceptabilité du secteur</b>                   | Faible pour les aéroports concernés.                                                                                |
| <b>Difficulté de mise en œuvre</b>                | Risque d'enclavement, réticence des collectivités locales concernées. Proposition déjà en cours au niveau européen. |
| <b>Contournement possible (dont effet rebond)</b> | Report partiel sur les plateformes plus importantes qui ne distribuent pas de subventions.                          |

|                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|---------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Externalités</b> | Pour pallier le risque d'enclavement, demande forte de développement du ferroviaire dans les régions concernées. Sentiment d'abandon des employés de ces aéroports, déjà considérablement mis à mal par la crise de la COVID. Alternative possible : conditionner les subventions à la mise en œuvre d'un plan de sobriété. |
|---------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

| Moratoire sur la construction de nouveaux aéroports ou terminaux |                                                                                                                            |
|------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Effet escompté</b>                                            | Ralentissement de la croissance du trafic.                                                                                 |
| <b>Acceptabilité des citoyens</b>                                | Bonne.                                                                                                                     |
| <b>Acceptabilité du secteur</b>                                  | Moyenne.                                                                                                                   |
| <b>Difficulté de mise en œuvre</b>                               | Facile à mettre en œuvre, peut s'accompagner de restrictions sur l'extension des systèmes de pistes et des parkings avion. |
| <b>Contournement possible (dont effet rebond)</b>                | Report du trafic sur d'autres plateformes si le périmètre d'application est trop restreint.                                |

| Fixation d'un prix plancher sur les billets       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|---------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Effet escompté</b>                             | Éviter l'effet d'aubaine.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| <b>Acceptabilité des citoyens</b>                 | Moyenne.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| <b>Acceptabilité du secteur</b>                   | Moyenne.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| <b>Difficulté de mise en œuvre</b>                | On pourra par exemple analyser l'impact de la décision de l'Autriche sur les transporteurs au départ du pays de fixer un prix plancher de 40 Euros <sup>329</sup> . Recouvrir ad minima par le prix du billet l'ensemble des coûts afférents à la production du service paraît justifié et compréhensible par le public utilisateur. Une étude de sensibilité au prix serait intéressante à mener : à quel seuil d'augmentation du prix du billet le trafic commence-t-il à chuter ? Cela permettrait de juger de l'efficacité prix sur le potentiel de diminution des émissions. |
| <b>Contournement possible (dont effet rebond)</b> | Augmentation des programmes de fidélité, baisse compensatoire du prix des extras pour les low-costs.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| <b>Externalités</b>                               | Inégalités sociales accentuées, sauf si la mesure est appliquée de manière progressive, et si par ailleurs le prix plancher évite le dumping social (cf. low cost carriers) des employés du secteur.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |

326 À l'instar des Frequent Flyer Levy et Air Miles Levy proposés en Angleterre par le Committee on Climate Change. <https://www.airportwatch.org.uk/2019/10/report-for-the-ccc-recommends-not-only-a-levy-on-number-of-flights-someone-takes-but-their-length-and-seat-class/>

327 En 2018 il y a eu une Etude conduite en Suède concernant l'acceptabilité d'une taxe carbone sur les billets d'avion (<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/14693062.2018.1547678>). L'étude conclut de manière intéressante que la réinjection des revenus d'une telle taxe dans des projets aidant la transformation du secteur (Earmarking revenues) améliorerait l'acceptabilité des citoyens.

328 <https://www.capital.fr/entreprises-marches/l-ue-veut-limiter-les-aides-publiques-aux-compagnies-aeriennes-1102164>

329 <https://www.air-journal.fr/2020-06-09-autriche-600-millions-pour-austrian-et-un-prix-plancher-5220744.html>

| Système de quotas                                 |                                                                                                                                                                                                            |
|---------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Effet escompté</b>                             | Distribution équitable du droit à voyager.                                                                                                                                                                 |
| <b>Acceptabilité des citoyens</b>                 | Forte car juste socialement. Proposition déjà soutenue par certains politiques.                                                                                                                            |
| <b>Acceptabilité du secteur</b>                   | Moyenne.                                                                                                                                                                                                   |
| <b>Difficulté de mise en œuvre</b>                | Étudier la question de la possibilité de revente, de la récompense de la non-utilisation, du cumul dans le temps. Besoin d'une gestion spécifique de la continuité territoriale (vers outre-mer et Corse). |
| <b>Contournement possible (dont effet rebond)</b> | Report sur les personnes morales (entreprises) si la mesure ne concerne que les personnes physiques.                                                                                                       |

| Loterie                                           |                                                                                                                                                                                                                                                         |
|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Effet escompté</b>                             | Distribution équitable du droit de voyager.                                                                                                                                                                                                             |
| <b>Acceptabilité des citoyens</b>                 | A priori faible, le tirage au sort pour l'accès à un droit n'ayant pas bonne presse en France, en témoigne son abandon pour l'accès aux études supérieures dans les filières en tension <sup>330</sup> .                                                |
| <b>Acceptabilité du secteur</b>                   | Moyenne.                                                                                                                                                                                                                                                |
| <b>Difficulté de mise en œuvre</b>                | Doit être présentée sous un angle ludique et/ou prévoir une compensation financière. Par exemple, l'État pourrait organiser la mise en place d'une loterie pour une partie des vols long-courriers de loisir et prendre en charge une partie du billet. |
| <b>Contournement possible (dont effet rebond)</b> | Organisation d'un marché secondaire des tickets gagnants, concentrant l'accès à l'offre vers les personnes les plus aisées.                                                                                                                             |
| <b>Externalités</b>                               | Cette mesure peut être utilisée comme un instrument complémentaire de pilotage des émissions du secteur aérien, en régulant d'une année sur l'autre le nombre de billets en fonction de l'effort de sobriété à atteindre.                               |

| Limitation du fret                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|---------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Effet escompté</b>                             | Diminution du nombre de mouvements de fret.                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| <b>Acceptabilité des citoyens</b>                 | Bonne.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| <b>Acceptabilité du secteur</b>                   | Faible.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| <b>Difficulté de mise en œuvre</b>                | Définir ce qu'est une alternative acceptable, sachant qu'un report sur le fret ferroviaire ou maritime est rarement possible. Le report sur le fret routier est à étudier en fonction de la nécessité de transporter rapidement certaines marchandises, nécessité qui devra elle-même faire l'objet d'une réglementation préalable. |
| <b>Contournement possible (dont effet rebond)</b> | Report sur les avions passagers dont le remplissage est parfois optimisé par le fret.                                                                                                                                                                                                                                               |

| Restriction de l'usage de loisirs                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|---------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Effet escompté</b>                             | Baisse de la demande pour les vols touristiques, qui comptent aujourd'hui pour environ la moitié des usages.                                                                                                                                                                                           |
| <b>Acceptabilité des citoyens</b>                 | Faible.                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| <b>Acceptabilité du secteur</b>                   | Très faible.                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| <b>Difficulté de mise en œuvre</b>                | Crainte d'une baisse significative d'activité pour le secteur touristique français, complexification du processus d'achat (nécessité de fournir une attestation de déplacement professionnel ou de rapprochement familial).                                                                            |
| <b>Contournement possible (dont effet rebond)</b> | Usage de faux.                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| <b>Externalités</b>                               | Perte potentielle d'emplois dans le tourisme international. En France, passage à un tourisme plus local, ou maintien d'un tourisme européen via un report sur le transport ferroviaire ou routier (plus de 75% des touristes ayant visité la France en 2018 sont originaire d'Europe <sup>331</sup> ). |

| Limitation des déplacements professionnels        |                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Effet escompté</b>                             | Diminution des rendez-vous lointains en présentiel, au profit de la visioconférence ou des outils de collaboration à distance.                                                                                                                                      |
| <b>Acceptabilité des citoyens</b>                 | Bonne.                                                                                                                                                                                                                                                              |
| <b>Acceptabilité du secteur</b>                   | Faible.                                                                                                                                                                                                                                                             |
| <b>Difficulté de mise en œuvre</b>                | Requière une bonne coordination entre différents services de l'entreprise (RH, achats, direction financière) pour être mis en œuvre de façon efficace et acceptée. Optimum délicat à trouver entre le gain des déplacements et leur coût (financier et écologique). |
| <b>Contournement possible (dont effet rebond)</b> | Pression des entreprises pour déclarer les voyages comme étant réalisés à des fins personnelles, si aucune restriction ne les encadre.                                                                                                                              |
| <b>Externalités</b>                               | Création d'emplois dans l'accompagnement au déploiement de solutions de collaboration à distance.                                                                                                                                                                   |

330 [https://www.ccomptes.fr/sites/default/files/2017-10/20171019-rapport-admission-post-bac\\_0.pdf](https://www.ccomptes.fr/sites/default/files/2017-10/20171019-rapport-admission-post-bac_0.pdf)

331 [https://www.entreprises.gouv.fr/files/files/directions\\_services/etudes-et-statistiques/4p-DGE/2019-07-4Pn88-EVE.pdf](https://www.entreprises.gouv.fr/files/files/directions_services/etudes-et-statistiques/4p-DGE/2019-07-4Pn88-EVE.pdf)

### 7.4.5 Conclusion

**Réduire les usages du transport aérien n'est pas un projet en soi, c'est une façon de répondre à la contrainte physique imposée par le changement climatique.** Néanmoins, ce constat doit provoquer une réflexion sociétale sur les usages du transport en général et du transport aérien en particulier : **à quels usages l'avion doit-il répondre en priorité dans un monde bas carbone ?** Une fois le cadre physique fixé, répondre à cette question en citoyens éclairés et convaincus de la nécessité de refondre nos modes de vie offre des perspectives bien plus enthousiasmantes que la simple idée de décroître de manière subie. En outre, répondre à cette question pourrait être structurant y compris pour une stratégie industrielle. S'il s'avérait, par exemple, que l'avion était considéré comme indispensable en premier lieu pour les très longues distances, par exemple pour maintenir des liens entre les peuples de la terre, s'enrichir de la diversité des cultures et des modes de vies, alors les stratégies industrielles de développement devraient se concentrer sur le long courrier en priorité. La législation, la fiscalité, les aides financières, les primes sont des instruments activables pour mettre en œuvre un tel projet de transformation. En revanche, si nous ne changeons pas notre rapport au voyage ou au déplacement, alors effectivement la limitation, inévitable dans tous les cas, sera source de frustration, vécue comme une injustice, une contrainte autoritaire entravant la

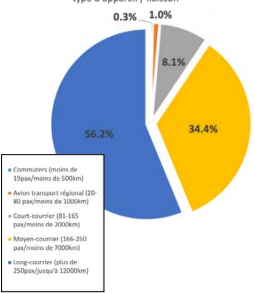
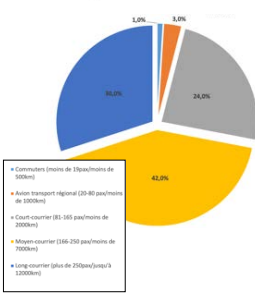
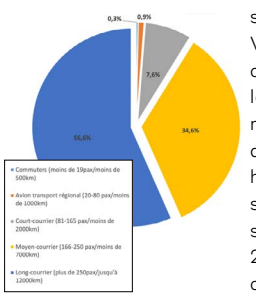
liberté de se déplacer, de travailler, de prospérer, de partir en vacances. Plus nous refusons cette réalité, plus nous tardons à entrer dans cette dynamique de changement, à faire ces choix, plus la contrainte sera brutale et autoritaire, plus le secteur aérien en souffrira. Nous avons maintenant l'opportunité de nous saisir de la contrainte climatique et de l'inscrire dans un autre rapport au voyage, au tourisme, dans une réorganisation globale du travail, des congés, des déplacements professionnels, dans une redéfinition de nos priorités de vie. Ce faisant le transport aérien bénéficiera de perspectives sur le long terme, à l'intérieur desquelles l'innovation jouera un rôle essentiel et prendra tout son sens.

## 8 Les scénarios d'émissions à l'échelle monde

**Nous avons dit plusieurs fois cette évidence : le transport aérien trouve intrinsèquement sa place, son usage et donc son marché dans un contexte international.** Si, aujourd'hui, le pouvoir public légitime se trouve en grande partie à l'échelle des pays (ou d'unions économiques de pays), les grands aviateurs et motoristes sont eux naturellement positionnés sur le marché mondial. Ainsi, pour le cas de l'Europe, et de la France en particulier, qui dispose d'une part importante de l'industrie aéronautique mondiale sur ses territoires, la question de la décarbonation, du développement de l'innovation, du futur du trafic aérien, de la croissance économique du secteur et de ses impacts sociaux **se pose à l'échelle internationale.** En outre, force est de constater que la majorité des clients d'Airbus ne sont pas français et que, jusqu'à présent, les perspectives de croissance sont plutôt en Asie, en Afrique, au Moyen-Orient ou même aux États-Unis qu'en Europe.

Aussi, si l'analyse sur le périmètre France, avec ses spécificités territoriales, énergétiques et organisationnelles et l'ensemble des acteurs nationaux du transport aérien, nous semble essentielle pour éclairer les politiques nationales et mesurer les impacts sur les emplois nationaux du transport aérien (compagnies, aéroports...), il est essentiel de passer à l'échelle mondiale pour évaluer les trajectoires climatiques réelles et les impacts sur les emplois dans l'industrie.

## 8.1 Les hypothèses Monde

| Hypothèse de référence                                                                   | FRANCE<br>(périmètre « DGAC »)                                                                                                                                                 | MONDE                                                                                                                                                                          | Commentaire                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Émissions 2018</b><br>(MtCO <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> uniquement + Amont)        | 26,8                                                                                                                                                                           | 1 077                                                                                                                                                                          | cf. 5.7.1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| <b>Budget Carbone 2018-2050</b> (MtCO <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> uniquement + Amont) | 536                                                                                                                                                                            | 21 598                                                                                                                                                                         | cf. 5.9.3                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| <b>Trajectoire tendancielle de référence</b>                                             | Chute de 66% du trafic en 2020, reprise au niveau de 2019 en 2024 puis croissance de 4%                                                                                        | IDEM                                                                                                                                                                           | Cf.5.9.4. La croissance France est inférieure à la moyenne monde, mais nous alignons ici les hypothèses initiales par souci de simplification, l'objectif étant d'ajuster cette hypothèse in fine pour être au budget                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| <b>Axes court-terme et opérations en vol</b>                                             | Évalués en détail au §7.2.1 et 7.2.2.1 et conduisant à un gain de 10,5% réalisé en 2050                                                                                        | Reprise d'un gain de 10,5% à horizon 2050 incluant l'optimisation des opérations                                                                                               | Les calculs reposant sur les hypothèses France ne sont pas réalisables à ce stade avec ce niveau de détail à l'échelle monde.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| <b>Roadmap avion</b>                                                                     | Définie en 7.2.2.2                                                                                                                                                             | IDEM                                                                                                                                                                           | Le marché des avions est international. Les roadmaps avion sont donc disponibles pour tous les clients.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| <b>Carburants alternatifs</b>                                                            | Hypothèses de production nationale : 2,37 Mt de bio-carburant 2G à 80% de gain d'émissions et 4Mt PTL à 82% de gain en 2050                                                    | 500 Mt de bio-carburant 2G à 80% de gain d'émissions et 250 Mt PTL à 95% de gain disponibles en 2050.                                                                          | <p>Cf. 7.2.2.3 et Note de Calcul</p> <p>L'hypothèse de 500 Mt de production monde est détaillée dans la suite (*). Cela correspond in fine à une hypothèse où la production de biocarburant permet de satisfaire à terme les besoins du transport aérien dans le scénario « MAVERICK ».</p> <p>Le « pouvoir décarbonant », c'est-à-dire le taux d'émission de CO<sub>2</sub> comparé à celui du kérosène, est conservé entre la France et le monde. Le rapport McKinsey en présente d'autres, plus optimistes, mais pas suffisamment explicités.</p> <p>Le pouvoir décarbonant des PTL dépend du processus de captation de CO<sub>2</sub> et des émissions du mix électrique utilisé pour sa fabrication. Nous restons dans un premier temps sur l'hypothèse éolienne sur les 2 périmètres.</p> |
| <b>Répartition des émissions par type d'avion</b>                                        | <p>Estimation des répartitions des émissions France 2019 par type d'appareil / liaison</p>  | <p>Estimation des répartitions des émissions France 2018 par type d'appareil / liaison</p>  | <p>Estimation des répartitions des émissions France 2018 par type d'appareil / liaison</p>  <p>Cf. Note de calcul. La différence majeure se situe dans la répartition long-courrier VS court et moyen-courrier, en particulier car les roadmaps avion ne prévoient la technologie hydrogène disponible au mieux pour les moyen-courriers. L'impact de la décarbonation par la technologie hydrogène est donc particulièrement sensible à cette répartition, l'effet Monde sera supérieure à l'effet France. Dans les 2 cas, ces répartitions sont supposées constantes dans le temps.</p>                                                                                                                   |
| <b>Renouvellement des flottes</b>                                                        | 15 ou 25 ans                                                                                                                                                                   | 15 ou 25 ans                                                                                                                                                                   | Cf.7.2.2.4. 25 ans, c'est le temps moyen de renouvellement de la flotte mondiale estimé par l'OACI. Les hypothèses de renouvellement prises sont identiques à l'échelle monde et France.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| <b>Mix Électrique</b>                                                                    | Eolien France<br><br>14,9 gCO <sub>2</sub> /kWh                                                                                                                                | Eolien Monde<br><br>11 gCO <sub>2</sub> /kWh                                                                                                                                   | Cf. 7.2.2.3. Le choix du Mix électrique et de son intensité carbone est déterminant dans l'efficacité décarbonnante des technologies Hydrogène LH <sub>2</sub> et PTL (cf. 7.2.2.3). L'éolien est pris en première hypothèse car il est cité comme source d'énergie préférentielle par le secteur. L'impact de sa variabilité est étudié en 7.2.2.3 et celui de ses externalités sera étudié en détails dans les scénarios afin d'évaluer la faisabilité et les implications de ces choix.                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| <b>Compensation</b>                                                                      | CORSIA*                                                                                                                                                                        | CORSIA*                                                                                                                                                                        | CORSIA* est un système CORSIA idéal (cf. 5.6.2) généralisé à toutes les routes, appliqué à 100% dès 2020 dont nous retirons le volume compensé du bilan carbone réel. Toutes ces hypothèses surestiment très largement l'effet de décarbonation réel des systèmes de compensation.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |

(\*) 500 Mt est la quantité annuelle potentielle de SAF 2G mondial estimée dans le rapport McKinsey<sup>332</sup> basé sur une estimation des ressources biologiques mondiales disponibles. C'est donc une estimation de potentiel et une limite physique, et non une prévision de production. De la même façon que pour le périmètre France, nous prenons l'hypothèse, dans le scénario « MAVERICK »-Monde, que cette limite physique est atteinte en production en 2050 avec une croissance de production de 25% les 10 premières années et de 15% ensuite. La trajectoire de production étant structurante sur les résultats, nous passons cette hypothèse au crible de quelques publications de référence :

- Le même rapport McKinsey (Figure 12) prévoit une production de SAF en 2025 allant de 4,2 Mt (selon les annonces actuelles des producteurs), à 7,6 Mt. La trajectoire « MAVERICK » passe elle par 10 Mt en 2025 ;
- L'OACI table sur 6,5 Mt produite en 2032<sup>333</sup>, contre 40 Mt dans la trajectoire « MAVERICK » ;
- Le scénario SDS de l'AIE prévoit une consommation de 75 milliards de litres en 2040<sup>334</sup>, soit environ 64 Mt<sup>335</sup>.

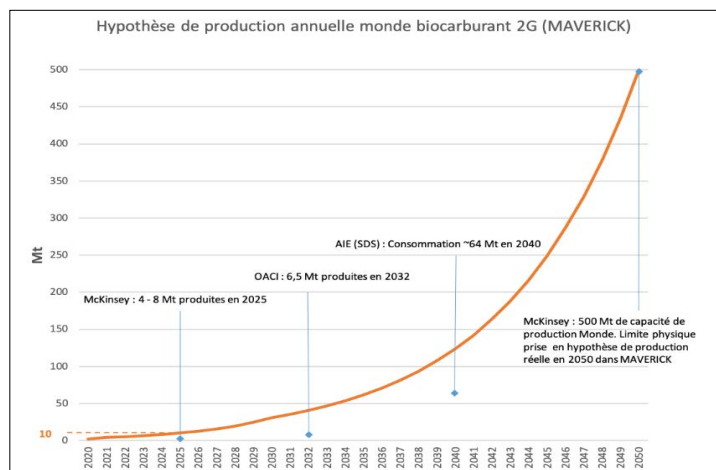


Figure 53 - Trajectoire de production annuelle SAF « MAVERICK » - Monde

La trajectoire de production de SAF du scénario « MAVERICK » – monde est donc significativement au-dessus des prévisions actuelles. Au-delà de la discussion sur la pertinence de ce chiffre de 500 Mt, c'est une hypothèse dans laquelle, à terme, la production ne limite pas la consommation.

332 Cf. figure 11, <https://www.mckinsey.com/industries/travel-logistics-and-transport-infrastructure/our-insights/scaling-sustainable-aviation-fuel-today-for-clean-skies-tomorrow>

333 <https://www.icao.int/Meetings/SAFStocktaking/Documents/ICAO%20SAF%20Stocktaking%202019%20-%20AI5-1%20Stocktaking%20Results.pdf>

334 <https://www.iea.org/commentaries/are-aviation-biofuels-ready-for-take-off>

335 En prenant une masse volumique de 0,85 kg/L

## 8.2 Extension des scénarios « MAVERICK » et « ICEMAN » au périmètre Monde

### 8.2.1 Scénario « MAVERICK »-Monde

#### Scénario « MAVERICK »-Monde

#### Définitions et Hypothèses

Cf. 8.1

#### Trajectoires carbone

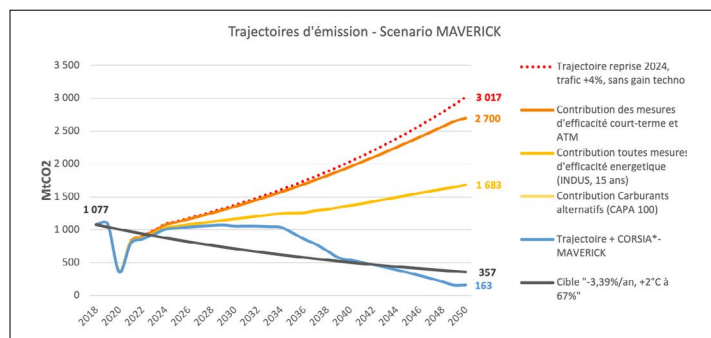


Figure 54 - Émissions annuelles, Scénario « MAVERICK » - Monde

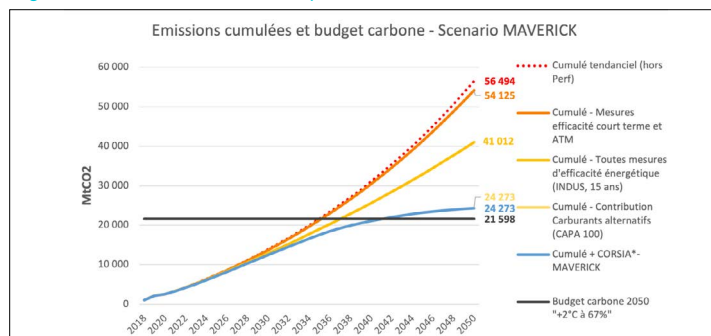


Figure 55 - Émissions cumulées et budget carbone, Scénario « MAVERICK » - Monde

#### Faits marquants

On observe une rupture de pente significative des émissions annuelles en 2035, c'est-à-dire à partir du moment où le CC et MC à Hydrogène entre en service (avec une cadence de renouvellement de la flotte mondiale en 15 ans).

A partir de 2040, 100% des besoins en carburants alternatifs sont satisfaits par la production (biocarburant + PTL).

Dans ce scénario, le mécanisme de compensation CORSIA\* ne s'active pas car la vitesse de déploiement du progrès technologique décarbonant permet de rester en dessous du seuil d'émissions de 2019 malgré la croissance du trafic.

#### Résultats et Impacts CO<sub>2</sub>

La progression de l'efficacité énergétique annuelle moyenne est de 2,01% à partir de 2024. Cette valeur est alignée avec les projections du secteur.

La cible atteinte en 2050 est meilleure que la trajectoire Secteur (cf. 5.9.5.3).

Le budget est atteint autour de 2041 et les émissions cumulées le dépassent d'environ 12% in fine.

**Malgré la saturation en carburant alternatif, la stratégie Hydrogène et l'accélération du renouvellement à 15 ans, le rythme de décarbonation ne suffit pas à rester dans le budget.**

### Consommation et externalités énergétiques

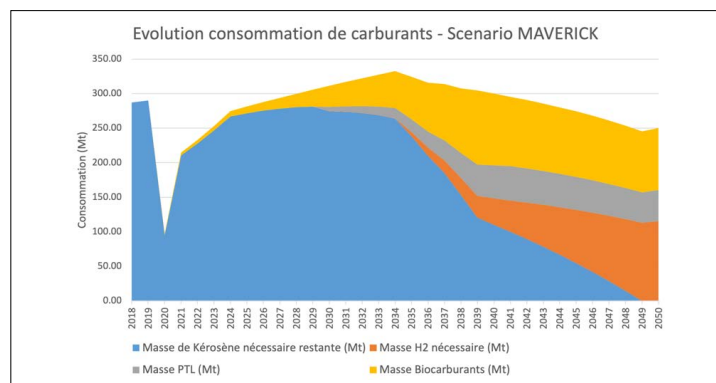


Figure 56 - Trajectoire de consommation de carburants dans le Scénario « MAVERICK » – Monde

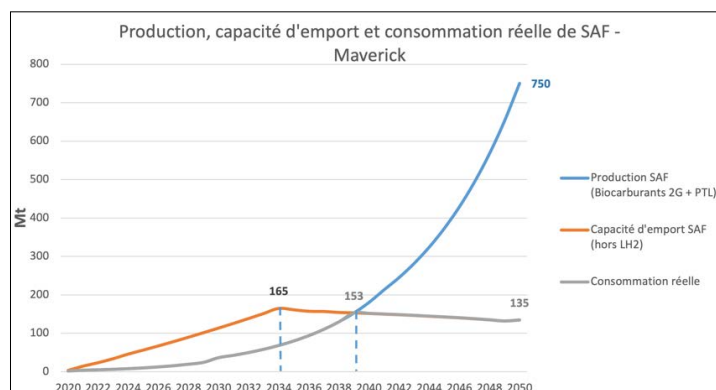


Figure 57 - Production, capacité d'export et consommation réelle SAF (Biocarb 2G et PTL) - « MAVERICK » - Monde

| Consommation de carburant en 2050 (Mt) |              |     |                 |
|----------------------------------------|--------------|-----|-----------------|
| Jet A-1                                | Biocarburant | PtL | LH <sub>2</sub> |
| 0                                      | 90           | 45  | 115             |

Tableau 13 - Consommation de carburants en 2050 dans le Scénario « MAVERICK » – Monde

La production de carburant alternatif n'est plus limitante à partir de 2039 dans ce scénario et le besoin maximum est de 165 Mt. Il est atteint en 2034 (avant l'arrivée des Courts et Moyens Courriers Hydrogène). L'amélioration de la performance énergétique amenée par le renouvellement de la flotte permet la baisse de la consommation globale de carburant jusqu'en 2049, mais comme ce scénario n'intègre pas de nouvel avion avant 2050 et que le trafic continue d'augmenter, la consommation repart à la hausse par la suite.

L'énergie électrique nécessaire pour produire ces quantités de PtL et de LH<sub>2</sub> est de 8 571 TWh (2 033 TWh pour les PtL et 6 538 TWh pour le LH<sub>2</sub>), ce qui nécessiterait un parc éolien dédié au transport aérien environ 6 fois supérieur au parc éolien mondial total installé en 2019.

Les externalités énergétiques de ce scénario sont là encore considérables, en particulier du point de vue de la production électrique.

### Externalités emplois

Ce scénario est plus favorable aux emplois de l'industrie. Les impacts emplois des scénarios sont étudiés plus en détail au paragraphe 9.

### Pousser encore plus loin ?

La Figure 57 permet de visualiser que, dans ce scénario, l'atteinte au plus tôt des 165 Mt de production de SAF permettra d'améliorer les émissions. Dans un scénario où la demande en SAF serait toujours satisfaite, nous pourrions nous approcher significativement du budget. Mais il faudrait pour cela passer la production de ~7 à 165 Mt autour de 2034, ou multiplier par 24 les projections actuelles (cf. Figure 53).

### Conclusions

Le scénario « MAVERICK »-Monde en l'état permet de se rapprocher des objectifs de décarbonation sans les atteindre, mais il suppose des externalités énergétiques et des hypothèses d'approvisionnement en carburant alternatifs considérables, ainsi qu'une roadmap avion, une organisation internationale et un rythme de renouvellement accéléré sans faille. Il présente donc un niveau de risque très important et il est très peu probable qu'il se réalise en l'état.

## 8.2.2 Scénario « ICEMAN »-Monde

### Scénario « ICEMAN » – Monde

### Définitions et Hypothèses

Le scénario « ICEMAN »-Monde se définit par rapport au scénario « MAVERICK » – Monde de la même façon qu'« ICEMAN » – France par rapport à « MAVERICK » – France : décalage de la roadmap Avion de 5 ans, 50% de la capacité de production de carburant alternatif, renouvellement de la flotte en 25 ans.

## Trajectoires carbone

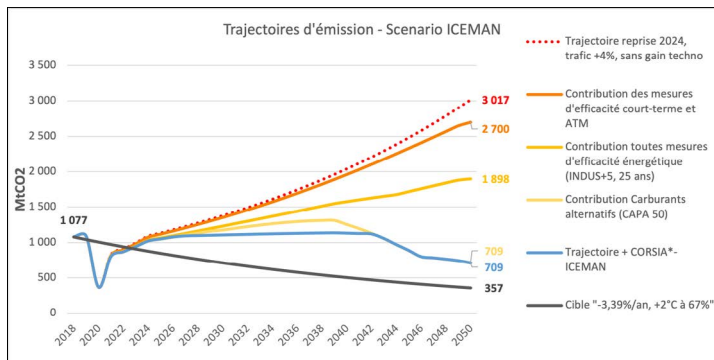


Figure 58 - Émissions annuelles, Scénario « ICEMAN » - Monde

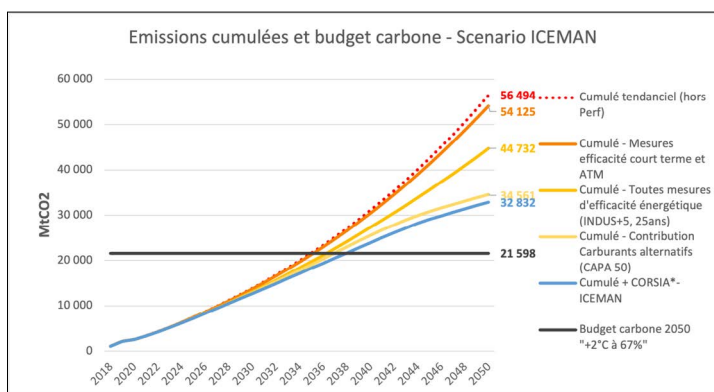


Figure 59 - Émissions cumulées et budget carbone, Scénario « ICEMAN » - Monde

## Faits marquants

Le processus de décarbonation est bien plus lent.

En 2050, le renouvellement des flottes Moyen-courrier et Long courrier n'est pas terminé, seule 40% de la flotte est renouvelée. En effet, la nouvelle génération d'appareils a été mise en service en 2040 et le renouvellement se fait en 25 ans.

1,7 GtCO<sub>2</sub> à compenser par les compagnies entre 2027 et 2042 via le système CORSIA\*.

## Résultats et Impacts CO<sub>2</sub>

La progression de l'efficacité énergétique annuelle moyenne est de 1,56% à partir de 2024 : c'est en dessous des scénarios optimistes du secteur mais cela reste un objectif ambitieux, loin d'être acquis d'avance.

La cible atteinte en 2050 est très loin de la cible secteur (cf. 5.9.5.3), pourtant ce scénario n'est pas particulièrement pessimiste.

Le budget est atteint autour de 2038 et les émissions cumulées le dépassent d'environ 52% in fine, toujours en comptant la compensation comme décarbonation, ce qui est largement discutable.

Si le rythme de décarbonation est ralenti, notamment en début de période, le budget reste inatteignable dans ces hypothèses. Le résultat est meilleur au niveau monde qu'au niveau France car l'effet de l'hydrogène est plus important sur les moyens et courts courriers.

## Consommation et externalités énergétiques

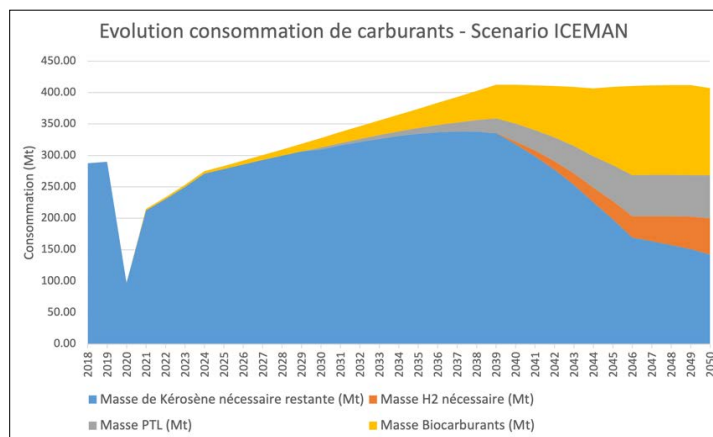


Figure 60 - Trajectoire de consommation de carburants dans le Scénario « ICEMAN » - Monde

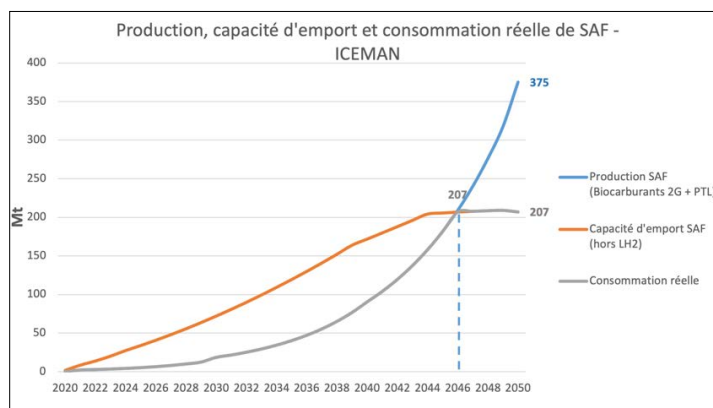


Figure 61 - Production, capacité d'emport et consommation réelle SAF (Biocarb 2G et PTL) - « ICEMAN » - Monde

| Consommation de carburant en 2050 (Mt) |              |     |                 |
|----------------------------------------|--------------|-----|-----------------|
| Jet A - 1                              | Biocarburant | PtL | LH <sub>2</sub> |
| 142                                    | 138          | 69  | 58              |

Tableau 14 - Consommation de carburants en 2050 dans le Scénario « ICEMAN » - Monde

La production disponible in fine répond aux besoins de la flotte dans ce scénario, mais le retard dans la roadmap avion et le temps de renouvellement fait que la décroissance de consommation de kérosène est retardée et ralentie et que le pic de demande de SAF est supérieur à celui de « MAVERICK » (209 Mt).

L'énergie électrique nécessaire pour produire ces quantités de PtL et de LH<sub>2</sub> est de 6 389 TWh (3 125 TWh pour les PtL et 3 264 TWh pour le LH<sub>2</sub>), ce qui nécessiterait un parc éolien dédié au transport aérien environ 4,5 fois supérieur au parc éolien mondial total installé en 2019.

## Conclusions

Le scénario « ICEMAN » présente plus de marges pour la gestion des risques industriels, pour l'approvisionnement en carburants alternatifs et la gestion des externalités énergétiques. Cependant, tout en représentant un défi important pour sa mise en œuvre, il s'éloigne fortement de la cible de décarbonation malgré une forte sollicitation du système de compensation. Il n'est donc pas acceptable seul en l'état.

### Écarts caractéristiques avec les scénarios France

Même s'ils ne parviennent pas à atteindre le budget, les scénarios monde apparaissent significativement meilleurs que les scénarios France. Les deux hypothèses structurantes à cela sont les suivantes :

- **Abondance de biocarburants :** dans les deux scénarios monde, la production de biocarburants répond mieux à la demande, et n'est pas limitante in fine. La production du Scénario « ICEMAN » est plus proche des projections actuelles du secteur à horizon 2040, mais reste très importante à horizon 2050.
- **Majorité de courts et moyens courriers.** Les courts et moyens courriers représentent la majorité des vols (66% en 2018), la décarbonation apportée par la technologie LH<sub>2</sub> (sous condition de mix énergétique éolien à 11gCO<sub>2</sub>/kWh) est donc plus efficace au niveau monde qu'au niveau France où la majorité des émissions est due aux long-courriers.

## 8.3 Conclusions

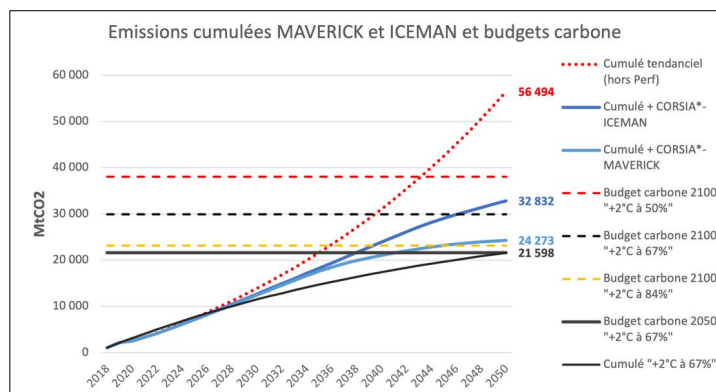


Figure 62 - Émissions cumulées « MAVERICK » et « ICEMAN » Monde et Budgets Carbone

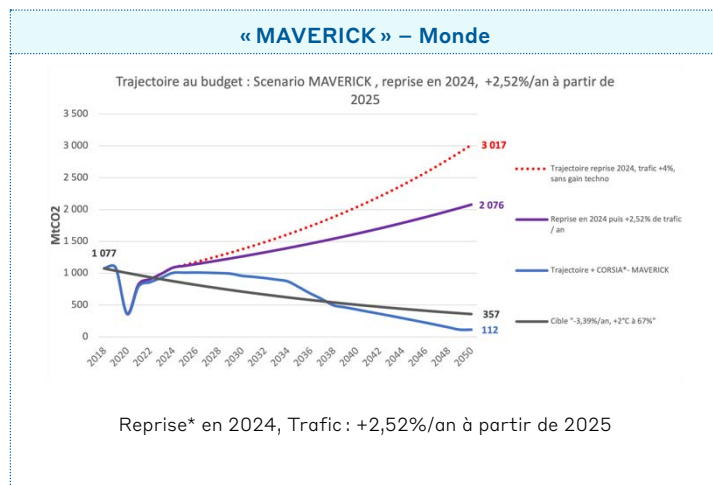
Si les trajectoires au niveau monde sont meilleures qu'au niveau France, de par les hypothèses de répartition de flotte et d'abondance de carburant alternatif, aucun des 2 scénarios ne parvient à rester dans un budget carbone qui permet de rester sous les 2°C avec une probabilité de 67% si l'on maintient une hypothèse de croissance moyenne de trafic de 4%. C'est une course contre la montre qui ne pourrait se gagner que si le progrès technique et logistique décarbonant et les quantités nécessaires de carburants alternatifs étaient déjà là. Par ailleurs, le critère « 67% » a été retenu car c'est celui qui fait référence dans

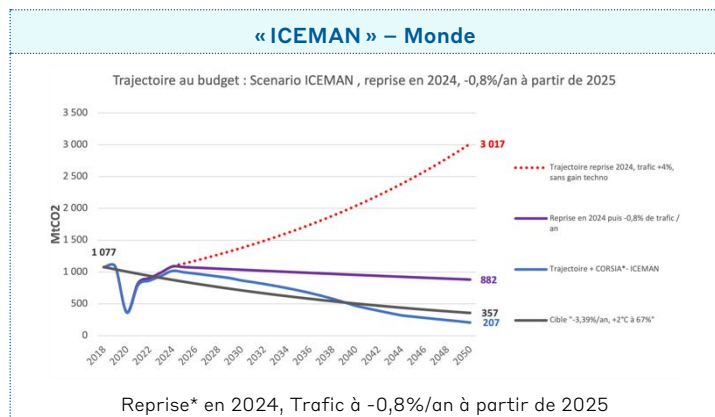
les publications scientifiques (en particulier celles du GIEC), néanmoins, ce budget s'éloigne significativement de la cible « +1,5 °C » (avec une probabilité inférieure à 20%), donc de l'esprit des Accords de Paris. Le budget « +2°C à 84% » est évidemment plus exigeant, mais plus conforme aux Accords de Paris et, au vu des conséquences attendues du réchauffement climatique au-delà de +2°C, très pertinent à étudier. De plus, il faut garder en tête qu'ici, seules les émissions de CO<sub>2</sub> ont été étudiées. La contribution du transport aérien au réchauffement climatique est bien supérieure à celle du seul CO<sub>2</sub> émis, en particulier dans une dynamique de croissance où les effets hors CO<sub>2</sub> à courte durée de vie sont entretenus dans la durée par la croissance du trafic (cf.5.7.2).

**Forts de ce constat, nous proposons trois options théoriques pour modifier les trajectoires et rester dans ces budgets :**

- **Parier sur plus d'amélioration technique et plus vite que dans le scénario « MAVERICK » :** c'est un pari très risqué, le scénario « MAVERICK » étant déjà une limite très haute de ce que l'on peut attendre du progrès technique et engendrant déjà des externalités énergétiques considérables.
- **Rehausser le budget carbone :** cela nécessite déjà de le définir au niveau international, de le piloter et d'effectuer des arbitrages intersectoriels forts, le budget global n'étant pas négociable. Il faut garder en tête qu'il n'y a pas aujourd'hui de gouvernance internationale en place pour cela et que, le secteur aérien est déjà largement en compétition avec les autres secteurs sur l'accès aux ressources bas carbone et au financement de ses programmes de développement. Nous sommes aujourd'hui assez loin de cette possibilité. Le pilotage budgétaire global est une cible plus qu'intéressante à atteindre (voir proposition 0 au §6), mais il n'est pas raisonnable de ne compter que sur cette option.

- **Revoir l'hypothèse de trafic à la baisse :** Il est essentiel d'intégrer cet élément dans les trajectoires de décarbonation afin d'établir une politique de sobriété pertinente et acceptable (cf. 7.4) et d'anticiper les conséquences sur l'emploi du secteur aérien.





En adaptant les hypothèses initiales de trafic en entrée des scénarios « MAVERICK » et « ICEMAN », nous pouvons moduler ces scénarios de sorte que les émissions cumulées restent dans l'enveloppe budgétaire carbone. Les résultats sont présentés au Tableau 15 selon l'hypothèse de reprise en 2024 au niveau de 2019 et évaluation de la croissance maximum / décroissance nécessaire pour rester dans le budget. Cet exercice permet d'évaluer l'ordre de grandeur de l'effort nécessaire de sobriété selon les scénarios. Ainsi, dans le cas d'une reprise en 2024, la croissance annuelle moyenne du trafic mondial à partir de 2025 pourrait varier de  $\sim +2,5\%$  à  $\sim -1\%$  selon les scénarios.

Il est important de rappeler encore ici que :

- Ces chiffres sont à prendre comme des ordres de grandeur ;
- Ces chiffres sont des moyennes mondiales. La situation dans chaque région du monde étant bien différente, les solutions techniques et de sobriété doivent être adaptées pour optimiser leur efficacité et leur acceptabilité sociale.
- Le scénario « MAVERICK » autorisant  $\sim +2,5\%$  de croissance post 2024 est une limite supérieure fortement improbable au vu des hypothèses techniques, industrielles, organisationnelles et économiques le conditionnant.

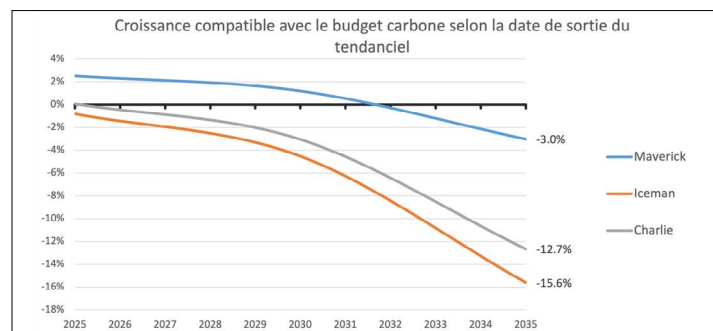
**Ainsi, aucun scénario ne permet à la fois de maintenir le niveau de croissance d'avant crise et de rester dans un budget carbone permettant de rester sous la barre des +2°C avec une probabilité de 67%.**

Par ailleurs, les deux scénarios ci-dessus restent très théoriques quant aux deux hypothèses fortes qui les sous-tendent, à savoir :

1. Que le trafic retrouvera en 2024 son niveau de 2019.
2. Qu'il ne repartira pas sur son rythme de croissance d'avant crise, du fait d'une modification durable du marché ou du fait d'un consensus mondial trouvé sur la modération de la croissance.

Dans le cas d'une régulation volontaire par consensus mondial, cela supposerait non seulement de pouvoir savoir à tout moment quel scénario industriel est en train de se réaliser, mais surtout de s'accorder sur un équilibre acceptable entre les taux de croissance des différentes régions du monde. Et si ce consensus n'était pas établi en 2025, mais en 2030,

voire en 2035 ? Et qu'en attendant le trafic continuait de croître selon la trajectoire tendancielle ? Quel serait alors l'effort de sobriété supplémentaire auquel consentir, à supposer que le budget carbone ne soit pas déjà épuisé ?



**Figure 63 - Évolution de la croissance de trafic compatible avec le budget carbone en fonction de l'année où la trajectoire décroche du tendanciel**

La Figure 63 montre l'évolution de l'effort de sobriété à fournir par rapport à la trajectoire tendancielle pour rester dans le budget carbone, en fonction de l'année où la trajectoire décroche du tendanciel, spontanément ou parce qu'un consensus international sur la modération de la croissance du trafic est établi. Quel que soit le scénario industriel, tout différé dans la mise en application d'un trafic réduit est sanctionné par une réduction d'autant plus importante. À titre d'exemple, le scénario « MAVERICK » autorise une croissance positive de 2,52% à compter de 2025 uniquement si un consensus international sur cette valeur est établi d'ici-là. Si le transport aérien international met 10 ans de plus pour s'entendre sur la nécessité de modérer le trafic, il faudra alors que ce dernier décroisse de 3% par an à partir de 2035, au moment même où l'avion à hydrogène entrera en service. Dans le cadre du scénario « ICEMAN » (plus probable nous le rappelons) le coût de la non maîtrise des émissions à court terme est potentiellement dévastateur (-15,6% par an à partir de 2035 si une croissance de 4% par an reprend entre 2025 et 2035).

**Ainsi, nous nous trouvons dans une situation dans laquelle il faut à la fois faire des choix tactiques permettant de maîtriser les émissions à court-terme et rester dans le budget carbone, et des choix stratégiques permettant de pérenniser le niveau d'émission du secteur aérien post 2050. À budget carbone constant, plus nous tardons, plus les conséquences sur le trafic, et donc sur la santé du secteur aérien, seront importantes.**

## 9 Considérations sur le futur de l'emploi dans le secteur aérien

### 9.1 Introduction

Comme pour tous les secteurs intenses en énergie, la décarbonation du transport aérien est un enjeu crucial pour sa survie à terme dans un monde bas-carbone. Même si les perspectives technologiques laissent augurer des progrès significatifs dans les prochaines décennies, il est raisonnable de considérer que nous ne puissions faire l'économie d'une sobriété d'usage si nous voulons respecter notre budget carbone (voir conclusions des scénarios techniques 8.3 et 7.2.4). **Dès lors, quels futurs pouvons-nous imaginer pour l'emploi dans un secteur doublement menacé, à court terme par la crise sanitaire, à long terme par la pression écologique ?**

Si l'objectif de ce rapport est en premier lieu d'évaluer quantitativement les possibilités pour l'aviation de réduire ses émissions et de chiffrer les externalités sous-jacentes (notamment en ce qui concerne la disponibilité et l'allocation futures d'énergie bas-carbone), il semble essentiel de donner quelques éléments prospectifs quant aux risques sociaux-économiques qui pèsent sur le secteur. En pointer les forces et les faiblesses dont une analyse approfondie (que nous ne prétendons pas mener ici) permettrait de jeter les bases d'une stratégie de diversification.

Nous insistons sur l'importance d'une vision holistique de la potentielle diversification du secteur visant à accroître sa résilience dans un futur plus instable. Dans cette approche, les compétences individuelles ne sont qu'une partie de l'équation. Toute stratégie de diversification ou de reclassement qui se focaliserait uniquement sur les métiers passerait à côté d'une grande partie de la valeur économique et industrielle construite de longue date par le secteur, riche en bien des aspects :

1. Le **capital humain** évidemment, soit l'ensemble des compétences et savoir-faire individuels dont le niveau d'expertise et d'excellence n'est plus à démontrer.
2. Le **capital humain collectif**, soit l'ensemble des structures sociales, des équipes jusqu'à la culture d'entreprise, en passant par les organisations syndicales, constitue le liant socio-économique du secteur, porté par plus d'un siècle de récits d'exploration et d'innovation technologique.
3. Les **structures de savoir**, soit l'ensemble des établissements d'enseignement supérieur et de recherche.
4. Les **infrastructures de production et de distribution** (aéroports inclus), optimisées au cours des décennies pour parvenir au niveau d'excellence et d'efficacité actuel.
5. L'**efficacité organisationnelle**, soit l'ensemble des processus et méthodes ancrés dans l'ADN de l'entreprise qui au fil des années lui ont permis d'optimiser sa manière de travailler. Airbus excelle par exemple sur la mise

en œuvre de grands projets industriels, dans un réseau complexe d'interactions public-privé, régulés par l'administration (Airworthiness Authorities). Il s'agit également de l'efficacité et de la maturité de l'organisation (formalisation des procédés, logique d'amélioration continue, formation des opérateurs, processus qualité).

6. Le **maillage territorial**, soit la capacité d'une industrie à s'insérer de manière coordonnée dans un tissu d'économies locales tout en poursuivant une stratégie nationale ou supranationale. La résilience par ancrage territorial est également facilitée par l'ensemble des partenariats déjà noués avec d'autres entreprises, via le réseau de sous-traitance et de collaboration et les liens de confiance mutuelle qui s'y sont forgés. Tout cela est précieux et long à construire !

7. Le **capital financier**, soit la capacité des acteurs à résister aux crises et à lever des fonds.

8. Le **capital commercial**, soit l'image véhiculée par la marque, mais également toute la clientèle.

9. Le **savoir non-humain**, typiquement les données, de production mais aussi de consommation, qui recèlent un potentiel de savoir énorme quant aux gisements d'optimisation industrielle et aux usages des consommateurs.

### 9.2 Scénarios Monde

**Dans quelle mesure l'exigence de respect du budget carbone affecte-t-elle l'emploi à long terme dans le secteur ?**

Pour répondre à cette question, nous faisons le choix de ne considérer que les scénarios à l'échelle mondiale<sup>336</sup> et étudions différentes possibilités de tenir le budget carbone que nous nous sommes fixés d'ici 2050.

**N.B.** Tous les scénarios que nous considérons dans cette section sont construits de manière à **respecter le budget carbone**. L'effort de réduction des émissions qui ne peut être pris en charge par la technique est mis en œuvre via une **politique de modération de trafic**. Les leviers d'une telle politique de sobriété ont été décrits dans les sections 7.3 et 7.4. Nous nous intéressons ici à ses **conséquences sur l'emploi**.

Notre analyse se base sur deux classes de scénarios :

1. **Les scénarios industriels**, qui font essentiellement varier les facteurs suivants :  
A/ Respect des délais de la roadmap avion vs décalage de 5 ans.

<sup>336</sup> L'industrie est en effet essentiellement stimulée par la demande internationale. Quant au transport, dans la mesure où les vols internationaux représentent environ quatre cinquièmes des émissions considérées dans le périmètre français de ce rapport, il ne nous semble pas erroné en première approche de dimensionner les emplois dans les compagnies et les aéroports en fonction de la dynamique mondiale d'évolution du trafic.

B/ Cadence de renouvellement des flottes : 15 ans vs 25 ans.

C/ Taux de disponibilité des carburants alternatifs pour l'aviation : 100% vs 50%.

**2. Les scénarios de croissance du trafic.** Nous faisons ici la double hypothèse que le trafic reprendra en 2024 à son niveau de 2019 et qu'un consensus international sera établi afin de modérer sa croissance dans des proportions compatibles avec le respect du budget carbone. La variable dont nous étudions ici l'impact est la date d'établissement de ce consensus (2025, 2030 voire 2035).

**Deux des trois scénarios industriels présentés ici, « MAVERICK » et « ICEMAN », ont déjà été décrits en 7.2.3. Nous nous contentons de rappeler ici leurs caractéristiques. Nous ajoutons en revanche un scénario intermédiaire baptisé « CHARLIE », afin de mieux évaluer l'incidence de la cadence de renouvellement des flottes sur l'emploi à long terme.**

Tableau 16 – Rappel des hypothèses des scénarios « MAVERICK », « CHARLIE » et « ICEMAN »

|                                                                        | « MAVERICK »  | « ICEMAN »       | « CHARLIE »      |
|------------------------------------------------------------------------|---------------|------------------|------------------|
| Roadmap avion                                                          | Pas de retard | Décalée de 5 ans | Décalée de 5 ans |
| Cadence de renouvellement                                              | 15 ans        | 25 ans           | 15 ans           |
| Disponibilité des carburant alternatifs pour l'aviation                | 100%          | 50%              | 50%              |
| Hypothèse raisonnable / Hypothèse optimiste / Hypothèse très optimiste |               |                  |                  |

La probabilité de réalisation de chaque scénario industriel dépend du degré d'optimisme de chaque hypothèse qui le constitue :

- Une roadmap avion tenue 15 ans après son annonce est une hypothèse optimiste, car les retards sont hélas fréquents dans les programmes de développement. Pour ne citer que quelques exemples récents : 18 mois de retard pour l'A380<sup>337</sup>, 2 ans de retard pour l'A350<sup>338</sup>, 2,5 ans de retard pour le premier vol du 787 et 3,5 ans pour sa mise en service<sup>339</sup>. Ce paramètre est particulièrement structurant, car tout retard dans la mise en œuvre d'une politique de décarbonation à budget carbone contraint augmente l'effort annuel à fournir pour réduire les émissions<sup>340</sup>.

- Un renouvellement en 15 ans de la flotte est une hypothèse très optimiste. Dans le contexte actuel de crise sanitaire, l'industrie réduit ses cadences et les compagnies sont exsangues. Le renouvellement n'est pas à l'ordre du jour. En situation "normale" la cadence actuelle maximale de production (1 600 avions par an environ<sup>341</sup>) n'est pas suffisante pour renouveler la flotte mondiale dans un contexte de croissance. Et dans un contexte de croissance ralentie, on ne peut que douter de la propension naturelle des compagnies à renouveler leur flotte hors de toute contrainte réglementaire. Par ailleurs, les risques de faillite qui pèsent sur les compagnies augmentent la probabilité, dans les prochaines années, d'introduire des volumes significatifs d'avions sur le marché de l'occasion.

- La disponibilité de 100% des carburants alternatifs pour l'aviation est enfin une hypothèse extrêmement forte, car elle suppose que les autres moyens de transport (notamment routier et maritime), seront considérés comme moins prioritaires pour leur propre décarbonation.

**Pour chaque scénario industriel nous ajustons, à partir de 2025, 2030 ou 2035, en fonction de l'année à laquelle un consensus sur la nécessité de modérer le trafic est établi, le taux de croissance annuel de manière à atteindre le budget carbone.** De là, nous en déduisons une prévision du trafic en 2050 par rapport à 2019, ce qui, en considérant en première approche que le nombre d'emplois est, à productivité égale, proportionnel au trafic, nous donne une bonne approximation du nombre d'emplois futurs dans le transport aérien.

Pour les emplois dans l'industrie, nous les dimensionnons sur la base d'une heuristique tirée de l'observation de la réduction d'emplois pendant la crise sanitaire. En 2020, la production d'avions a diminué de 40% et anticipe une année 2021 similaire. En conséquence, le groupe a annoncé vouloir licencier un peu plus de 10% de ces effectifs. Du côté des sous-traitants, ce chiffre pourrait grimper. Marwan Lahoud, Président du directoire d'ACE Management, a ainsi déclaré : *"Au regard des plans sociaux qui ont été déjà annoncés et compte tenu de la situation à laquelle l'industrie doit faire face, une estimation [de pertes d'emplois] comprise entre 15 et 20 % me paraît refléter ce qui nous attend."*<sup>342</sup> En première approximation, nous retiendrons donc qu'une baisse de 40% de la production entraîne une diminution d'emploi d'environ 15% à minima.

Cette heuristique est sans doute optimiste (du point de vue du nombre d'emplois) à long terme, pour deux raisons :

1. Les réductions d'emplois à court terme tiennent compte d'une espérance de reprise rapide. Aussi les acteurs de l'industrie préfèrent-ils maintenir leurs compétences technologiques et manufacturières quitte à payer les collaborateurs pour moins produire. La perspective d'une récession à long terme aurait certainement plus d'impact sur les emplois.

337 <https://www.google.com/amp/s/www.europe1.fr/politique/Airbus-a-livre-son-premier-A380-avec-18-mois-de-retard-235354.amp>

338 [https://fr.wikipedia.org/wiki/Airbus\\_A350\\_XWB](https://fr.wikipedia.org/wiki/Airbus_A350_XWB)

339 <https://www.lejdd.fr/Economie/Boeing-en-retard-sur-le-787-102193-3095234>

340 Pour respecter le budget carbone que nous nous sommes fixé, nous devons dès aujourd'hui et chaque année réduire nos émissions de 3,32%. Si nous différions le démarrage de la décarbonation de 5 ans, l'effort de réduction sera alors de 4,15% par an, et de 5,4% par an si nous attendons 10 ans de plus.

341 [https://fr.wikipedia.org/wiki/Concurrence\\_entre\\_Airbus\\_et\\_Boeing](https://fr.wikipedia.org/wiki/Concurrence_entre_Airbus_et_Boeing)

342 <https://www.usinenouvelle.com/article/notre-role-est-de-stimuler-la-consolidation-de-l-aeronautique-les-confidences-de-marwan-lahoud-president-du-directoire-d-ace-management.N1007239>

2. On ne peut présager de l'impact sur l'intensité en emplois d'une politique de compétitivité, telle que l'État entend promouvoir via le plan de soutien<sup>343</sup>.

En 2019, nous considérons que l'industrie mondiale était capable de produire environ 1 600 avions par an. Ce chiffre est obtenu en additionnant la production annuelle d'Airbus en 2019 et celle de Boeing en 2018, afin de ne pas tenir compte des effets déléteurs de la crise du 737 MAX. Enfin, nous considérons que la flotte mondiale comporte à date 23 000 avions<sup>344</sup>.

### 9.2.1 Famille de scénarios « MAVERICK »

**Tableau 17 - Scénarios « MAVERICK » permettant de rester dans le budget carbone selon la date de décrochage de la tendancielle.**

| Scénarios « MAVERICK »                          |                                                               |             |                                           |                                                |
|-------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|-------------|-------------------------------------------|------------------------------------------------|
| Période de renouvellement de la flotte mondiale | Croissance annuelle après décrochage de la tendancielle à +4% |             | Trafic projeté en 2050 par rapport à 2019 | Production d'avions en 2050 par rapport à 2019 |
|                                                 | Taux de croissance                                            | A partir de |                                           |                                                |
| 15                                              | 2,5%                                                          | 2025        | 191%                                      | 176%                                           |
| 15                                              | 1,2%                                                          | 2030        | 156%                                      | 144%                                           |
| 15                                              | -3,0%                                                         | 2035        | 91%                                       | 84%                                            |

Dans une hypothèse extrêmement optimiste où l'énergie bas carbone est disponible en masse pour l'aviation et où les progrès techniques permettent une décarbonation rapide, une croissance du trafic de 2,52% par an est théoriquement possible à partir de 2025. Ce chiffre reste toutefois inférieur à la trajectoire tendancielle du secteur ; même dans le plus favorable des scénarios, le budget carbone ne sera donc pas tenu sans une modération de la croissance. Par ailleurs, plus cette modération, qui ne pourra avoir lieu sans une coopération internationale forte, tarde à se mettre en place, plus les perspectives d'une croissance positive à long terme s'amoindrissent. Ainsi, si aucun accord international n'est trouvé en 2025 pour contenir la croissance du trafic et que ce dernier reprend après 2024 (scénario Eurocontrol<sup>345</sup> le plus optimiste aujourd'hui du point de vue du transport aérien) au rythme de 4% par an, alors nous serons contraints, pour respecter le budget, à une croissance de seulement 1,2% par an à compter de 2030 et de -3% par an en 2035 si la modération du trafic ne prend effet qu'à ces dates respec-

tives. S'organiser au plus tôt sur une croissance "encadrée" du trafic permet donc au secteur de créer plus d'emplois à terme (cf. les deux dernières colonnes du tableau ci-dessus), même si c'est au prix d'une reprise plus lente.

### 9.2.2 Famille de scénarios « ICEMAN »

**Tableau 18 - Scénarios « ICEMAN » permettant de rester dans le budget carbone selon la date de décrochage de la tendancielle**

| Scénarios « ICEMAN »                            |                                                         |             |                                           |                                                |
|-------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|-------------|-------------------------------------------|------------------------------------------------|
| Période de renouvellement de la flotte mondiale | Croissance annuelle après décrochage de la tendancielle |             | Trafic projeté en 2050 par rapport à 2019 | Production d'avions en 2050 par rapport à 2019 |
|                                                 | Croissance annuelle                                     | A partir de |                                           |                                                |
| 25                                              | -0,80%                                                  | 2025        | 81%                                       | 45%                                            |
| 25                                              | -4,52%                                                  | 2030        | 46%                                       | 25%                                            |

Le scénario « ICEMAN », beaucoup plus réaliste que le précédent, est hélas sans appel quant à la possibilité pour le trafic de croître tout en respectant le budget carbone. La croissance du trafic y est aux mieux de -0,8% par an, ce qui conduit en 2050 à une baisse d'activité de 19% dans le transport et d'environ 55% dans l'industrie, soit une réduction d'emplois d'au moins 20%, selon l'heuristique énoncée en infra s'appuyant sur les conséquences actuelles de la crise sanitaire. Les perspectives sont évidemment encore plus pessimistes si le trafic ne décroche de la tendancielle qu'en 2030.

Dans tous les cas, l'industrie est dans ces scénarios largement sous-utilisée en 2050 (au moins 55% de la capacité actuelle de produire ne sert plus). Si on ne la mobilise pas pour produire autre chose que des avions, la peine serait double : aux destructions d'emplois s'ajouterait le risque d'un déclin industriel qui sera très douloureux pour la France, en particulier pour la région du Grand-Ouest.

### 9.2.3 Famille de scénarios « CHARLIE »

**Tableau 19 - Scénarios « CHARLIE » permettant de rester dans le budget carbone selon la date de décrochage de la tendancielle**

| Scénarios « CHARLIE »                           |                                                         |             |                                           |                                                |
|-------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|-------------|-------------------------------------------|------------------------------------------------|
| Période de renouvellement de la flotte mondiale | Croissance annuelle après décrochage de la tendancielle |             | Trafic projeté en 2050 par rapport à 2019 | Production d'avions en 2050 par rapport à 2019 |
|                                                 | Croissance annuelle                                     | A partir de |                                           |                                                |
| 15                                              | 0,07%                                                   | 2025        | 102%                                      | 94%                                            |
| 15                                              | -3,04%                                                  | 2030        | 64%                                       | 59%                                            |

Une option envisageable pour limiter la décroissance de l'emploi dans l'industrie serait, par rapport au scénario « ICEMAN », d'accélérer la cadence de renouvellement des flottes,

343 L'intensité en emplois pourrait ainsi diminuer par optimisation des procédés industriels ou délocalisation d'une partie de la chaîne de valeur. Mais elle pourrait aussi augmenter du fait d'une production à terme réduite engendrant des coûts marginaux plus élevés (effet inverse des économies d'échelle). Le Shift Project défend l'idée que dans tous les cas de figure les risques sur les emplois doivent être anticipés par une politique d'État. Dans son Plan de transformation de l'économie française, le Shift Project pose ainsi la question de ce qui doit être mis en œuvre en termes de planification étatique pour garantir une perte d'emplois la plus limitée possible et des reconversions facilitées.

344 Airbus Global Market Forecast 2019-2038

345 <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2020-11/euro-control-five-year-forecast-europe-2020-2024.pdf>

la passant de 25 ans à 15 ans. À noter que si cette possibilité tempère les effets à long terme sur l'emploi, elle ne permet pas vraiment pour autant le retour à la croissance. Dès lors, comment les compagnies aériennes vont-elles pouvoir assurer un renouvellement à marche forcée sans croissance, alors que celles qui sortiront sur pied de la crise sanitaire devront faire face à une situation financière désastreuse ? Mission impossible a priori sans le soutien des états ou sans revoir en profondeur le business-model du transport aérien<sup>346</sup>.

### 9.2.4 En synthèse

Une sortie du COVID rapide (soit un retour en 2024 aux niveaux de 2019) ne permet pas d'espérer un retour de la croissance aux niveaux escomptés par le secteur, et seul le scénario « MAVERICK » autorise une croissance positive significative.

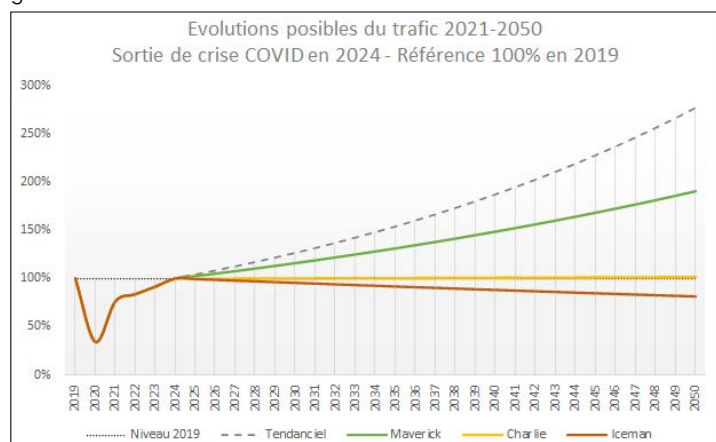


Figure 64 - Évolutions possibles du trafic par scénario, sous réserve de reprise en 2024 et de modération du trafic dès 2025

Modérer le trafic dès aujourd'hui permet d'économiser le budget carbone alors que le secteur n'est pas encore dé-carboné, et préserve donc les possibilités de croissance du secteur à horizon 2050.

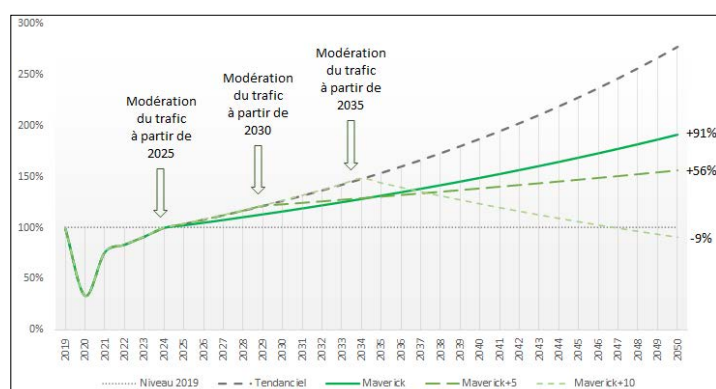


Figure 65 - Scénarios « MAVERICK » - Effet sur le trafic 2050 d'une modération effective en 2025, 2030 ou 2035

**Le scénario « ICEMAN », évidemment loin d'être souhaitable, reste néanmoins l'éventualité la plus probable dans notre cadre d'analyse.**

La perte d'emplois dans le secteur aérien semble donc malheureusement très difficilement évitable à long terme si nous souhaitons rester dans l'enveloppe du budget carbone alloué à l'aviation.

Il nous semble donc capital d'anticiper au mieux ses conséquences.

## 9.3 Quels(s) futur(s) pour le transport aérien en France ?

### 9.3.1 Situation socio-économique du secteur

En 2019 le secteur du transport aérien en France représentait 85 000 emplois dont 70% dans le transport de passagers<sup>347</sup>. La seule compagnie Air France employait alors 41 000 personnes.

C'est un secteur dont la rentabilité a été fortement mise à mal depuis une dizaine d'années. Outre la crise financière de 2009, le secteur a souffert de l'essor des *low cost* et du développement de l'offre de grande vitesse ferroviaire (qui comprend, elle aussi, une offre à bas coût avec Ouigo). Environ 42% des usagers de l'avion en France voyagent sur des compagnies françaises, contre 63% il y a 20 ans et, en huit ans, la France est passée du 5e au 8e rang mondial en termes de revenu par passager-kilomètre (RPK)<sup>348</sup>. La direction générale de l'aviation civile (DGAC) prévoyait, en début d'année 2020, une hausse du trafic passagers de seulement 2% dans l'année, contre une augmentation de 4% l'année précédente, à 179 millions de passagers, et ce, malgré les faillites d'Aigle Azur et d'XL Airways. Cette prédiction laissait envisager la plus faible croissance depuis dix ans<sup>349</sup>.

Entre 2012 et 2017, la branche du transport aérien en France a ainsi perdu 7% de ses emplois, alors que sur la même période, le trafic de passagers des aéroports français (métropole et DOM-TOM) a augmenté de 20%<sup>350</sup>. Entre 2010 et 2018, le groupe Air-France KLM a perdu 18% de sa masse salariale. Air France a connu divers plans de restructuration depuis une quinzaine d'années (notamment *Transform 2015* et *Perform 2020*), ayant finalement conduit à une stabilisation de l'effectif sur les 5 dernières années.

En ce qui concerne l'âge des actifs, près d'un salarié de la branche sur trois (32%) a plus de 50 ans, statistique en ligne avec la moyenne nationale<sup>351</sup>. L'âge moyen pour les salariés de la branche est de 44,3 ans. Enfin, en 2019, 1 500 départs à la retraite par an étaient anticipés dans les 5 ans à venir<sup>352</sup>.

347 F NAM, Rapport de branche 2019. <https://www.fnam.fr/files/download/52ad76e1f84ae6b>

348 <https://www.capital.fr/entreprises-marches/chiffres-acteurs-et-faibles-du-transport-aerien-francais-1278502>

349 <https://www.latribune.fr/entreprises-finance/services/transport-logistique/en-2020-la-croissance-du-traffic-aerien-francais-pourrait-etre-la-plus-faible-depuis-10-ans-837623.html>

350 F NAM, rapport de branche 2018 et 2019.

351 En 2016, 29% des actifs avaient plus de 50 ans. Source <https://www.insee.fr/fr/statistiques/3303384?sommaire=3353488>

352 Source: F NAM, rapport de branche 2019

346 Notamment le nombre de compagnies aériennes autorisées par territoire.

### 9.3.2 Trajectoires d'emplois

La crise sanitaire aggrave évidemment les difficultés que traverse la branche. Air France a ainsi annoncé en juillet 2020 vouloir supprimer 16% de ses effectifs d'ici 2022, la moitié de ces postes correspondant à des départs non remplacés. Cette décision difficile ramènerait le nombre d'emplois en 2022 à 84% du niveau de 2019, ce qui correspond à une prévision cohérente avec une reprise du trafic à l'horizon 2024.

**Au-delà de 2022, la trajectoire d'emplois dépendra du scénario de sobriété que nous choisirons d'implémenter,** si bien évidemment nous nous organisons collectivement pour cela. Faisons un instant cette hypothèse ; nous n'aurions alors que quelques années devant nous pour sauver l'emploi à terme, sans quoi de plus amples suppressions de postes à l'horizon 2050 seront inévitables.

Enfin, que se passera-t-il si la sortie de la crise sanitaire est plus longue que prévue ? Le scénario Eurocontrol<sup>353</sup> le plus pessimiste aujourd'hui, envisage un retour au niveau de 2019 seulement en 2029. Faudra-t-il alors compter sur une aide publique supplémentaire ? L'État a déjà accordé 7 milliards d'euros à Air France pour passer le cap de la crise et rien ne garantit qu'il en fera de même à l'avenir. L'état norvégien a récemment refusé d'accorder une aide supplémentaire à la compagnie en difficulté Norwegian,<sup>354</sup> ." Dans un contexte de pression écologique grandissante, cette décision pourrait faire des émules.

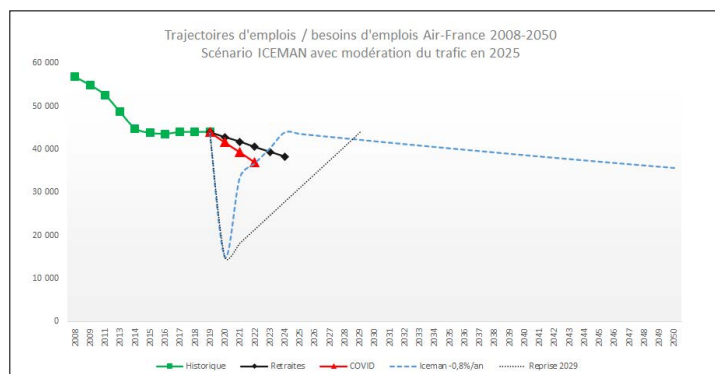


Figure 66 – Trajectoires d'emplois passées et futures pour Air France

#### En synthèse :

- Si le trafic reprend en 2024 (scénario optimiste), nous pouvons espérer qu'il n'y aura pas, à court terme, de vagues de licenciements autres que celles déjà annoncées. Cependant, le problème de l'emploi à long terme demeure entier et sa sauvegarde dépend d'une modération du trafic devant être organisée le plus rapidement possible, par exemple via un accord international.
- Si le trafic reprend en 2029, le problème est alors la gestion du court terme avec un besoin significatif de trésorerie pour assurer la survie du secteur et engager au plus tôt une politique concrète de décarbonation.

353 <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2020-11/euro-control-five-year-forecast-europe-2020-2024.pdf>

354 <https://www.la Tribune.fr/depeches/reuters/KB27P0ZO/nouveau-coup-dur-pour-norwegian-air-qui-ne-recevra-plus-de-soutien-d-oslo.html>

### 9.3.3 Géographie, âge et compétences

58% des emplois du secteur sont en Ile-de-France, et cette proportion monte à 70% si on inclut la Picardie. Ce phénomène de concentration des effectifs est d'autant plus fort pour le personnel au sol, qui réside pour plus des trois quarts dans le Nord de la France, en Île-de-France et dans les Hauts de France, à cause de leur proximité avec les aéroports d'Île de France. Tout effort de reclassement ou reconversion sera donc à mener dans ces régions en priorité.

Près d'un salarié de la branche sur trois (32%) a plus de 50 ans. Ceci est moins vrai chez les femmes, et par conséquent dans les fonctions de PNC<sup>355</sup> et de relation-client, familles d'activité les plus féminisées. À l'inverse, la famille PNT<sup>356</sup> compte près d'un salarié sur deux de 50 ans ou plus, et les deux tiers sont âgés de plus de 45 ans. La pyramide des métiers des salariés de plus de 59 ans permet d'observer les métiers les plus concernés par les prochains départs à la retraite : les cadres de l'organisation ou du contrôle des services administratifs et financiers, les officiers et cadres navigants techniques et commerciaux de l'aviation civile, ainsi que les responsables commerciaux et administratifs des transports de voyageurs et du tourisme. Ces métiers représentent un tiers des salariés de plus de 59 ans. D'après la FNAM, ces postes étant essentiellement des fonctions d'encadrement, les remplacements associés pourraient être assurés par de la mobilité interne, limitant ainsi le besoin d'attirer des emplois externes vers ce secteur en reconversion. Se poseront néanmoins les questions de l'équilibre et de la bonne transmission des compétences, si les effectifs doivent être réduits à terme et dans un contexte de crise sanitaire possiblement étendu. Le potentiel départ, à court et moyen terme, d'un grand nombre de salariés expérimentés (car âgés) ferait alors peser sur le secteur un risque de paupérisation du savoir, rendant d'autant plus difficile une continuité d'activité sur le long terme.

40% des effectifs occupent un emploi dont le transfert vers d'autres secteurs d'activité pose a priori peu de problèmes : Vente et après-vente, support et administration, logistique industrielle SI, RH finance et comptabilité, qualité, hygiène, sécurité et santé.

À l'inverse, 60% des effectifs ont en première approche un emploi en lien direct avec le transport aérien : personnel navigant, agents de maintenance, personnel de piste, agents d'escale, gestion du trafic, transport de fret. Ces emplois sont-ils pour autant cantonnés au secteur aérien ? S'il est clair que la reconversion du personnel navigant technique (PNT) vers un autre secteur n'a absolument rien d'évident, ces derniers ne représentent toutefois que 7% des effectifs. La catégorie d'emploi la plus représentée est celle du personnel navigant commercial (PNC) qui pèse pour 22% des emplois du secteur. Les PNC remplissent une mission de sûreté et de secourisme d'une part, de relation client d'autre part. Si le transport aérien représente logiquement le principal employeur en France de métiers spécifiques comme les hôtesses de l'air et stewards, dans quelle mesure ces derniers pourraient-ils exercer

355 Personnel navigant commercial (les hôtesses et stewards).

356 Personnel navigant technique, ou plus simplement les pilotes.

dans un autre secteur ? L'habitude du personnel à travailler en équipes toujours différentes, avec des horaires de travail très irréguliers et de nombreux déplacements loin de leur domicile sont, en plus des compétences d'assistance à la vie d'autrui, des atouts incontestables pour le tourisme (local et bas carbone bien sûr !), l'aide à la personne ou d'autres modes de transport par exemple<sup>357</sup>.

### 9.3.4 Le train peut-il sauver l'avion ?

**Il convient d'aborder, avec prudence, la piste ferroviaire, souvent considérée comme une solution naturelle au reclassement des emplois dans le transport aérien.**

A l'instar de l'ensemble du secteur des transports, le développement du ferroviaire est conditionné par le financement public des infrastructures. Or, l'investissement qui avait permis l'essor du train au cours de la première moitié du XX<sup>e</sup> siècle s'est ensuite tari au profit de la voiture individuelle. Le récent recentrage de la programmation des infrastructures sur le réseau ferroviaire classique, acté dans la Loi d'Orientation des Mobilités de 2019, permettra seulement de rattraper le retard accumulé - et ce, pas avant des années.

Le nombre d'agents SNCF est ainsi passé de 514 000 en 1938 à 142 000<sup>358</sup> aujourd'hui. Le long désintérêt de l'État pour ce mode de transport n'en est néanmoins pas la seule raison. On sait par exemple construire aujourd'hui des infrastructures qui nécessitent moins d'effort de maintenance qu'autrefois ; la mécanisation du travail a rendu le secteur moins intense en emplois qu'au début du siècle ; l'avènement du numérique a largement affaibli la vente en boutique et en gare. Enfin, une partie de l'effectif se trouve désormais dans des filiales qui n'interviennent pas en ferroviaire sur le marché français<sup>359</sup>. Dans le même temps, l'offre s'est polarisée vers la mobilité longue distance, avec le développement de lignes grande vitesse assorties d'exigences de rentabilité. Le transfert d'emplois vers le ferroviaire est donc avant tout lié au choix politique d'investir de nouveau dans le train<sup>360</sup>.

Par ailleurs, les métiers techniques ou d'exploitation de l'aérien et du ferroviaire présentent des différences significatives. Les PNT ne sont pas des conducteurs de train et il n'est pas évident qu'ils souhaitent le devenir, pour des raisons d'attachement à l'avion, mais aussi des questions d'âge ou de salaire. Si les syndicats suisses de l'aérien ont évoqué la possibilité d'encourager la reconversion des pilotes vers le secteur ferroviaire (en manque d'emploi), cette proposition n'a pas soulevé l'enthousiasme des organisations professionnelles chez Air

France<sup>361</sup>. La maintenance d'avions et de matériel roulant n'ont pas grand-chose à voir. Les agents de piste, avitailleurs, bagagistes, agents d'exploitation aérogare ou avion ne vont pas devenir du jour au lendemain agent de manœuvre, d'entretien du réseau ou aiguilleur sans accompagnement ni formation, donc sans volonté politique. Et nul besoin de mentionner que le métier de contrôleur aérien est très éloigné de ceux d'opérateur de circulation ferroviaire ou d'agent de régulation du trafic.

Enfin, la possibilité de transférer les métiers du fret aérien (affréteur, cariste, commissionnaire transport-douane, déclarant en douane, magasinier, responsable logistique...) vers le fret ferroviaire dépendra encore une fois avant tout de la volonté publique de réinvestir durablement dans ce secteur, la France étant très en retard par rapport à la moyenne européenne. L'article 178 de la Loi d'orientation des mobilités imposait à l'État de bâtir un plan fret pour la fin de l'année 2020. Pour y parvenir, l'alliance 4F (Fret Ferroviaire Français du Futur) a été officiellement lancée le 8 juin dernier. Le plan actuel présenté par 4F le 25 juin, chiffré à 15 milliards d'euros d'investissements sur 10 ans, vise un objectif de 18 % de parts de marché pour le fret ferroviaire en 2030. Ce chiffre est à mettre en relation avec la moyenne européenne, qui devrait atteindre 30% en 2030.

### 9.3.5 Valorisation des actifs

Au-delà de la reconversion des emplois, nous défendons l'idée qu'il faut questionner la valeur potentielle des actifs "non-humains" du transport aérien... dans un autre contexte que le transport aérien. C'est un sujet aussi passionnant que complexe, qui mérite une étude complète et dépasse largement le cadre du présent rapport. **Nous proposons toutefois deux idées qui pourraient être développées dans un travail ultérieur : la réutilisation des données du transport et la valorisation des infrastructures aéroportuaires.**

Les compagnies aériennes, dont le business model actuel repose sur des marges extrêmement réduites, ont développé des techniques d'apprentissage automatique et d'intelligence artificielle pour optimiser leurs opérations<sup>362</sup>. Ces techniques requièrent l'accès à une grande quantité de données, telles que celles accumulées au fil du temps par les grandes compagnies aériennes grâce à leurs programmes de fidélité-client. Ce type d'informations est par exemple aujourd'hui utilisé pour dimensionner des offres très individualisées<sup>363</sup>. Si le Big Data constitue aujourd'hui un enjeu stratégique de partage de la valeur dans le transport aérien, dans quelle mesure ces données pourraient-elles demain être valorisées dans une activité bas-carbone ? Une compagnie aérienne pourrait-elle exploiter ses données pour se reconvertir dans le développement d'une offre de tourisme local, dont le lancement pourrait être facilité par une utilisation prioritaire des avantages fidélité ?

357 Même si rien ne garantit que le personnel quittant l'aérien pour un autre secteur soit prêt à poursuivre ce "sacrifice consenti" de la régularité des horaires de travail.

358 [https://www.liberation.fr/france/2019/10/23/sncf-les-effectifs-fondent-le-volume-de-transport-explose\\_1759047](https://www.liberation.fr/france/2019/10/23/sncf-les-effectifs-fondent-le-volume-de-transport-explose_1759047)

359 Les seules filiales qui font du train sont Thalys et Eurostar.

360 C'est d'ailleurs une des orientations fortes du Plan de Transformation de l'Économie Française (PTEF) qui vise à articuler, de manière systémique, tous les leviers pour la décarbonation de notre économie - dont l'usage accru du train pour la mobilité longue distance, entre autres -, et donc également les leviers de transformation et de transfert d'emploi.

361 [https://www.lepoint.fr/economie/des-pilotes-suisses-bientot-aux-commandes-de-trains-15-11-2020-2401119\\_28.php](https://www.lepoint.fr/economie/des-pilotes-suisses-bientot-aux-commandes-de-trains-15-11-2020-2401119_28.php)

362 Voir par exemple: Optimizing and Digitizing Operations with Artificial Intelligence, BCG Gamma, <https://www.bcg.com/industries/travel-tourism/airline-industry/optimizing-digitizing-airline-operations>.

363 <https://www.latribune.fr/opinions/tribunes/les-compagnies-aeriennes-face-au-defi-du-big-data-587149.html>

Les infrastructures aéroportuaires sont un autre atout du secteur. Elles concentrent dans un espace réduit des zones d'activités riches en emplois. Que vont devenir ces zones dans un contexte de décroissance potentielle du trafic ? Aujourd'hui, ce sont quelques 200 aéroports qui sont au bord de la faillite du seul fait de la crise sanitaire<sup>364</sup>. Le sujet requiert une grande attention, d'autant plus qu'il n'existe que peu d'exemples réussis de reconversion d'aéroports<sup>365</sup>. D'un point de vue topographique, les aéroports sont des espaces dégagés, plats, souvent proches des métropoles et desservis par un réseau routier et de transport en commun conséquent, tout en étant à une distance de sécurité suffisante des habitations. Y sont par ailleurs implantées des infrastructures logistiques conséquentes. L'endroit serait-il propice à l'implanter de nouvelles industries ?

## 9.4 Quel(s) futur(s) pour l'industrie aéronautique ?

L'industrie aéronautique en France se portait bien jusqu'à la crise sanitaire. Depuis 1990, si l'industrie française dans son ensemble a perdu 1,5 millions d'emplois, l'activité aéronautique en a créé. Au niveau mondial, le nombre d'avions livrés chaque année a été multiplié par 4 sur la même période. En termes d'emplois manufacturiers, il pèse autant que l'automobile ou la fabrication de machines et équipements ou le double de l'équipement électrique. Le déclin du secteur aéronautique accélérerait l'écroulement de l'activité et de la capacité manufacturière en France.

### 9.4.1 L'industrie aéronautique dans le paysage économique Français

Le secteur aéronautique compte près de 200 000 emplois directs<sup>366</sup>, dont 160 000 dans le grand sud-ouest et 110 000 en Occitanie. Il est formé d'un tissu de 376 entreprises dont 176 PME<sup>367</sup>, installées principalement dans le sud-ouest. C'est un salariat très qualifié, travaillant dans les plus hautes normes de qualité, employant beaucoup d'ingénieurs français, capable d'innovation et de création de valeur économique importante.

Airbus, avec ses 3 divisions (Commercial Aircraft, Defence & Space, et Helicopters) emploie 130 000 personnes, dont 50 000 en France. Airbus Commercial Aircraft a réalisé 55 milliards d'euros de chiffres d'affaires en 2019<sup>368</sup> et livré 863 avions, son carnet de commande représente 412 milliards d'euros. On peut comparer ces chiffres aux exportations françaises de 2019, de 508 milliards d'euros de biens et 251

milliards d'euros de services, représentant un déficit commercial final de -59 milliards d'euros. L'aéronautique, elle, ayant un solde positif de 31 milliards<sup>369</sup>.

Airbus, plus grand donneur d'ordre en France, représente environ un quart de l'emploi du secteur aéronautique. Les autres grands donneurs d'ordres sont Dassault Aviation, Thales et Safran. Le reste du secteur est constitué d'un réseau d'entreprises plus petites preneuses d'ordres (et souvent mono-secteur). Airbus se partage le marché de l'aviation commerciale mondiale à parts égales avec Boeing (en attendant une montée en puissance du constructeur chinois COMAC) dans une organisation duopolistique qui "en temps normal" confine à une forme de conservatisme mimétique, où chacun attend de l'autre qu'il fasse le premier pas vers la nouveauté<sup>370</sup>.

L'industrie est, à ce jour, globalement dimensionnée en fonction des perspectives de croissance de la flotte, soit 4% par an environ avant la crise COVID, ce qui aurait fait passer la flotte mondiale de 23 000 appareils à 35 000 appareils en 10 ans<sup>371</sup>. Le Global Market Forecast d'Airbus<sup>372</sup> prévoyait quant à lui en 2019 une production de plus de 39 000 avions sur la période 2019-2038. Dans ces visions prospectives, la production future n'est allouée que pour un tiers au renouvellement, tandis que les deux autres tiers servent à la croissance du trafic. Une remise en cause de l'hypothèse de croissance obligera donc l'industrie à revoir à la baisse sa base salariale.

### 9.4.2 La quadrature du renouvellement

La flotte mondiale compte aujourd'hui environ 23 000 avions commerciaux pour une capacité de production mondiale (Airbus et Boeing confondus) d'environ 1 600 unités par an. Comme évoqué en supra, l'essentiel des nouveaux avions produits bénéficient aujourd'hui à la croissance de la flotte (elle-même tirée par la croissance du trafic) plutôt qu'à son renouvellement dont la cadence est un des leviers principaux de l'accélération de la décarbonation du secteur par le progrès technologique.

Or, la crise du COVID laisse augurer une longue période de production industrielle au ralenti. Airbus a, durant une partie de l'année 2020, tourné à moins de 50% de sa capacité de production, tandis que Boeing vient tout juste d'obtenir une nouvelle autorisation de vol pour le 737 MAX. Du côté de la concurrence asiatique, le japonais Mitsubishi a annoncé récemment suspendre son programme SpaceJet<sup>373</sup>, et le Chinois COMAC n'a à ce jour produit qu'un seul type d'appareil sur les trois de sa gamme, dont seuls une trentaine d'exemplaires ont été livrés à des compagnies exclusivement nationales<sup>374</sup>.

364 <https://www.lesechos.fr/industrie-services/tourisme-transport/deux-cents-aeroports-europeens-au-bord-de-la-faillite-1265698#x-tor=CS1-3046>

365 L'aéroport de Berlin-Tempelhof est un exemple qui présente la particularité d'être en pleine ville : <https://www.berlin.fr/aeroport-berlin-tempelhof>

366 <https://ecomnews.fr/article/Aeronautique-15-000-postes-pour-voir-2019>

367 <https://www.aireemploi.org/secteurs/industrie-aeronautique>

368 <https://www.airbus.com/investors/financial-results-and-annual-reports.html>

369 <https://www.vie-publique.fr/en-bref/273282-le-commerce-exterieur-de-la-france-sameliore-en-2019>

370 Il est ainsi assez remarquable qu'Airbus ait annoncé en pleine crise sanitaire un programme d'avion à propulsion hydrogène, décision courageuse qui mérite d'être saluée et qui fera peut-être réagir le constructeur américain.

371 <https://www.rolandberger.com/en/Point-of-View/COVID-19-How-we-will-need-to-rethink-the-aerospace-industry.html>

372 <https://www.airbus.com/aircraft/market/global-market-forecast.html>

373 [https://www.lemonde.fr/economie/article/2020/10/28/mitsubishi-suspend-son-projet-d-avion-de-ligne-spacejet\\_6057644\\_3234.html](https://www.lemonde.fr/economie/article/2020/10/28/mitsubishi-suspend-son-projet-d-avion-de-ligne-spacejet_6057644_3234.html)

374 <https://www.journal-aviation.com/actualites/44729-l-arj21-va-pouvoir-voler-pour-les-trois-grandes-compagnies-chinoises>

Cette pause de l'industrie n'est en rien une bonne nouvelle à court terme, puisqu'elle se traduit par une réduction d'emplois et un report du démarrage de la décarbonation par diffusion dans la flotte des modèles d'avions les plus performants. À plus long terme, tous nos scénarios 2050 s'accompagnent d'une modération du trafic, donc de la taille de la flotte. Pour préserver l'emploi dans l'industrie, il faudrait pouvoir à flotte constante agir sur la cadence de renouvellement. Dans deux familles de scénarios sur trois, nous faisons l'hypothèse que celle-ci sera portée à 15 ans au lieu de 25 ans aujourd'hui. Cela n'est évidemment possible que si les compagnies disposent de la trésorerie suffisante, et aujourd'hui ces conditions sont loin d'être réunies. L'IATA prévoit ainsi qu'en 2021 les transporteurs continueront de subir une perte globale de 5 à 6 milliards de dollars par mois et s'attend à de nombreuses faillites de compagnies<sup>375</sup>. Si cette hypothèse se vérifie, la taille de la flotte mondiale va diminuer. Les compagnies qui subsisteront, vraisemblablement grâce à l'argent public, devront donc négocier une aide supplémentaire pour renouveler leurs appareils, et ce d'autant que le marché des avions de seconde main risque de se développer, dopé par les faillites, et les baisses de taille de certaines compagnies. Il faudra des aides pour inciter à acheter des nouveaux avions performants aux constructeurs, plutôt que des avions moins récents, mais aussi moins chers en seconde main<sup>376</sup>. Le plan de soutien à l'aéronautique présenté par le gouvernement en juin dernier prévoit une aide de 7 milliards d'euros pour Air France ; c'est la somme nécessaire pour renouveler seulement la moitié de sa flotte d'A320 avec des appareils de la gamme Neo. Difficile donc d'imaginer comment amorcer la pompe sans injection massive de liquidités ou sans hausse significative du prix des billets.

A long terme, la seule possibilité de conserver une cadence actuelle de 1 600 avions par an serait, d'une part de modérer la reprise du trafic en 2024, d'autre part de renouveler les flottes en 10 ans. Scénario que nous n'avons pas détaillé, et pour cause : cela reviendrait à multiplier par 2,5 les coûts d'achat ou de location des avions pour les compagnies, et nécessiterait de revoir complètement le business model des opérateurs de maintenance. Mission impossible dans les conditions actuelles !

**Sans renouvellement accéléré des flottes, nous ne parviendrons pas à diffuser rapidement les avions moins émissifs**, et la nécessité de réduire le trafic, donc la taille de la flotte à terme, sera d'autant plus cruciale pour tenir le budget carbone. La contrainte écologique nous oblige aujourd'hui à faire un choix décisif pour l'avenir du secteur dans 30 ans. Ou bien nous investissons massivement pour changer le modèle de financement de l'innovation et soutenir l'activité industrielle, afin qu'elle serve intégralement la décarbonation du secteur plutôt que sa croissance, ou bien nous engageons une spirale destructrice à long terme. Il est illusoire de penser que l'investissement dans le développement d'un nouvel

avion hydrogène, qui ne devrait pas voir le jour avant 15 ans, résoudra seul ce problème, car ce seront uniquement les bureaux d'études qui seront mobilisés durant cette période, pas la production.

### 9.4.3 Fragilités d'une mono-industrie mono-produit

La crise sanitaire a révélé les fragilités d'une industrie jusqu'alors robuste. En seulement quelques mois, les compagnies aériennes ont multiplié les reports de livraisons d'avions et les plans de réductions d'effectifs pour sauver leurs trésoreries. Airbus et Boeing ont assisté à un véritable effondrement de leur activité, lequel a fait dire à Guillaume Faury, PDG d'Airbus, que l'industrie aérospatiale traversait la crise la plus grave de son existence. *«Pour les deux prochaines années, 2020-2021, nous considérons que la production et les livraisons seront inférieures de 40 % à ce que nous avions initialement prévu. [...] Nous ne pouvons pas nous dissocier de l'évolution des compagnies aériennes»*, a-t-il indiqué. En avril 2020, la pandémie avait déjà forcé Airbus à réduire de 30 % sa production.

Afin de passer le pire de la crise et conserver le savoir-faire industriel, un plan de soutien massif à l'industrie aéronautique a été mis en place. À l'exception du support au développement de l'avion à hydrogène, ce plan se compose d'un support à la demande – par le crédit-export afin d'aider les compagnies à acheter des appareils neufs – et une mise en veille du reste de l'appareil productif via un chômage partiel de longue durée et un fonds d'investissement afin d'abonder les fonds propres des entreprises en difficultés dans la chaîne de sous-traitance<sup>377</sup>. Cette mise en veille poursuit l'objectif de conserver au mieux la capacité de rebondir très rapidement, tout en maintenant les savoir-faire et la chaîne industrielle composée de PME et ETI.

**Toutefois ce plan de soutien – bien que massif – est intrinsèquement fragile car entièrement conditionné à une sortie de crise à court terme.** Or, la reprise du trafic aérien au niveau mondial n'est pas du ressort des seuls états européens, qui ne peuvent supporter indéfiniment le secteur dont la croissance est fortement tirée par la demande en Asie. Une chute drastique du trafic pourrait pousser des compagnies à la faillite et donc à brader leur flotte, concurrençant ainsi la production d'avions neufs pour plusieurs années. Airbus se voit donc obligé d'ajuster sa taille à la demande prévue en sortie de crise, et a ainsi annoncé une réduction d'emplois devant être finalisée avant l'été 2021<sup>378</sup>. Le plan concerne 15 000 postes dans le monde (soit plus de 10% des effectifs), dont 5 000 en France et 3 500 à Toulouse. Ces chiffres pourraient de fait fortement empirer : dans son pire scénario, le cabinet Roland Berger estime que la demande d'avions à produire d'ici 2030 pourrait chuter à 10 000 unités, contre 22 000 avant COVID. Ce chiffre est dans l'enveloppe de notre famille de scénario « ICEMAN », dont le pire cas laisse présager une baisse de production de 60% à l'horizon 2050, soit une perte d'emploi d'au moins 20%, en extrapolant les ratios observés lors de la crise sanitaire.

375 <https://www.deplacementspros.com/covid-19/de-nombreuses-compagnies-aeriennes-menacees-de-faillite-previent-liatg>

376 Au-delà des enjeux financiers, renouveler à une fréquence plus élevée nécessite de disposer de matériaux aéronautiques (notamment les métaux) en quantité suffisante. Ce sujet n'est pas abordé dans ce rapport, mais nécessite une étude à part entière !

377 <https://www.ladepeche.fr/2020/06/10/les-annonces-du-plan-de-soutien-8925542.php>

378 [https://actu.fr/occitanie/toulouse\\_31555/toulouse-plan-social-chez-airbus-vers-licenciements-cascade-chez-sous-traitants\\_34711068.html](https://actu.fr/occitanie/toulouse_31555/toulouse-plan-social-chez-airbus-vers-licenciements-cascade-chez-sous-traitants_34711068.html)

Outre l'incertitude liée à la reprise du trafic aérien et des commandes d'avions neufs, l'industrie aéronautique européenne pourrait faire face à un risque politique majeur. Prendre l'avion régulièrement est un marqueur social fort, combiné à un impact climatique élevé, ce qui le rend potentiellement explosif. Ainsi, l'industrie aéronautique pourrait devenir en Europe un bouc émissaire si elle ne s'engage pas pleinement dans la transition énergétique. Déjà, une partie non-négligeable d'élèves ingénieurs s'inquiètent du futur du secteur<sup>379</sup>, signes d'un questionnement sur son attractivité et d'un risque de perte de futurs talents à prendre au sérieux. Si la dynamique d'opposition à l'avion venait à prendre de l'ampleur, le soutien politique dont bénéficie actuellement l'industrie pourrait être remis en question. Ce risque pourrait même hypothéquer son futur si le financement de nouveaux programmes venait à être impacté ou dans l'hypothèse de futures crises...

Il convient de garder à l'esprit que la crise actuelle n'est, a priori, pas un phénomène isolé. De nouvelles crises d'amplitude comparable mais de nature potentiellement différente –, climatique, géopolitique, sanitaire, etc. voire multiforme – sont à anticiper, les facteurs de risques se multipliant, engendrés par la modification des écosystèmes causés par le réchauffement climatique et la perte de biodiversité liée aux activités humaines (cf. 4.2).

La résilience de l'industrie face à ce risque est donc primordiale. Le plan de soutien doit être donc être complété car cet aspect n'en fait pas partie. Aujourd'hui, les revenus d'Airbus proviennent essentiellement de la gamme A320, elle-même principalement liée à l'aviation civile. N'importe quel accident industriel sur cet avion aurait des conséquences économiques de grande ampleur, en attestent les déboires de Boeing avec le 737 MAX. Cet aspect devient un problème d'ordre systémique lorsque l'on considère le poids économique de l'aéronautique dans le Grand-Ouest, en particulier la région toulousaine. Cette dernière, souvent vantée comme l'une des capitales mondiales de l'aéronautique, reste en situation de mono-industrie et de dépendance économique extrême au secteur, à tel point que les analystes et journalistes économiques locaux évoquent un possible "syndrome de Detroit"<sup>380</sup>.

Les fournisseurs aéronautiques sont aussi très peu diversifiés et, dans le pire des cas, mono-client. Par ricochet, c'est toute la chaîne des fournisseurs qui sera frappée par un affaiblissement d'Airbus. Après avoir investi pour répondre à la hausse des cadences de production envisagée avant la crise du COVID<sup>381</sup> en vue de recettes futures, les fournisseurs, notamment de rang 2 et 3 ainsi que les PME, se retrouvent

aujourd'hui fragilisés. Les acteurs de maintenance sont également touchés, ainsi que les motoristes dont le modèle économique est en partie basée sur le service après-vente.

#### 9.4.4 Comment gérer les risques de demain ?

Paradoxalement, nous montrons dans ce rapport qu'une baisse prolongée du trafic est positif à long terme dans une optique de budget carbone contraint. Nous sommes de fait confrontés à un problème multidimensionnel complexe, dans lequel chacun des risques se caractérise par plusieurs dimensions intimement imbriquées :

- La temporalité,
- Les échelles géographiques,
- Des sphères économiques interdépendantes,
- etc.

Ce rapport permet de rendre sensible – c'est-à-dire de mesurer, quantifier – l'impact de la nécessaire transition énergétique sur l'industrie aéronautique qui navigue entre plusieurs échelles :

- Mondiale, car les clients d'Airbus sont répartis autour du globe,
- Européenne, de par l'implantation majoritaire de la production en Europe
- Locales, car les milliers de personnes faisant partie de cette industrie vivent dans des lieux bien définis.

Aujourd'hui, la transition énergétique s'impose à l'industrie aéronautique européenne, non pas à travers des quotas mondiaux d'émissions, mais bien à travers le débat politique à l'échelle nationale et européenne. Les risques directs, soulignés plus haut, sont une perte d'attractivité du secteur, et une progressive perte de soutien politique. **S'engager encore davantage sur les questions climatiques s'avère donc primordial pour l'industrie aéronautique européenne.**

Si notre proposition n°0 (cf. §6) d'inclure les émissions carbone aéronautiques dans les budgets carbone nationaux était reprise, il n'y aurait toujours pas de quotas mondiaux mais bien des choix nationaux et multilatéraux car la répartition des budgets carbone entre secteurs au sein de chaque pays, ou ensembles de pays, relèvera bien de choix souverains. Comme il est peu concevable qu'une majorité de pays allouent une part croissante d'émissions au transport aérien, cela ouvrirait des opportunités comme un avantage concurrentiel pour les avions les moins émissifs et l'accélération du renouvellement des flottes. Pour rappel, les scénarios « ICEMAN » et « CHARLIE » montrent qu'un renforcement de la cadence seule permettrait d'augmenter sensiblement le trafic aérien (≈10 à 15%) tout en quasi-doublant la production à horizon 2025 (cf. 9.2).

Sur le court terme, cela revient à accepter une diminution durable des commandes avec les impacts que l'on observe

379 [https://www.lemonde.fr/idees/article/2020/05/29/aeronautique-la-transition-ecologique-impose-une-profonde-transformation-de-notre-industrie\\_6041127\\_3232.html?fbclid=IwAR3EYfk-kn4IGX-lgADZBOvRq4F58q9DEZ\\_g7zIEeHYbzprNj5sRjZ7XrORQ](https://www.lemonde.fr/idees/article/2020/05/29/aeronautique-la-transition-ecologique-impose-une-profonde-transformation-de-notre-industrie_6041127_3232.html?fbclid=IwAR3EYfk-kn4IGX-lgADZBOvRq4F58q9DEZ_g7zIEeHYbzprNj5sRjZ7XrORQ)

380 Vers une crise économique majeure dans Toulouse et sa région. Toulouse, le syndrome Détroit ? par des représentants locaux de Copernic, Attac, l'Université Populaire de Toulouse et des Amis du Monde Diplomatique, le 22 avril 2020. Toulouse veut éviter le « syndrome Detroit », Matthieu Jublin, Alternatives économiques, le 17 juin 2020.

381 <https://www.latribune.fr/entreprises-finance/services/transport-la-gistique/transport-aerien-dix-ans-au-mieux-pour-rattraper-la-courbe-de-croissance-d-avant-crise-844872.html>

déjà (cf. 5.8). Une fois ce constat établi, nous devons élargir notre point de vue et considérer l'ensemble des tissus industriels et économiques dans lesquels s'insère l'aéronautique afin d'**améliorer la résilience du secteur et des économies locales avec une seule stratégie : la diversification du tissu industriel**.

Cela permettrait de sécuriser la construction aéronautique, qui ne sera pas arrêtée pour autant, mais aussi d'éviter à plusieurs régions – dont Toulouse – le « syndrome de Détroit ». Ce dernier n'aurait que des effets néfastes par ricochet sur l'industrie aéronautique locale : perte d'attractivité, mouvements sociaux, investissements publics moindres, etc.

Or, le plan de soutien actuel n'envisage que peu de diversification (et au mieux sur une durée limitée) et pourrait même favoriser l'émergence d'entreprises « zombies »<sup>382</sup>. Cela aurait pour conséquence de freiner les investissements nécessaires à la décarbonation de l'aéronautique et érodant ainsi notre avance technologique, alors que la priorité est de rendre notre industrie davantage résiliente et que le savoir-faire de l'industrie aéronautique est une opportunité dans la réindustrialisation européenne.

#### 9.4.5 Vers une nouvelle aventure industrielle

Les compétences de l'aéronautique sont très variées, aussi bien dans l'ingénierie que dans la manufacture. L'éventail de compétences en métallurgie, mécanique, électricité, hydraulique, matériaux, systèmes, électronique embarquée, aérodynamique, calcul de stress, est extrêmement large. Dans chacun de ses savoir-faires, l'aéronautique atteint des hauts niveaux d'excellence et des capacités d'innovation servis par un contrôle qualité exceptionnel, déployés sur des lignes de production de très grande taille. C'est un outil industriel unique en Europe. Compte tenu des risques évoqués en supra, ainsi que de l'impossibilité de rester dans le budget carbone sans modérer le trafic, l'emploi est à terme menacé dans le secteur si ce dernier ne s'ouvre pas vers la diversification. La préservation à long terme des outils de production, des emplois et des compétences doit être une des préoccupations premières d'une stratégie industrielle : **si nous anticipons aujourd'hui qu'elle servira moins demain, ne peut-on donc rediriger l'industrie et ses savoir-faire vers une production non-aéronautique ?**

##### L'exemple de Sud-Aviation

Cette idée n'est pas nouvelle. C'est celle-là même qui fut plébiscitée en 1960 par les pouvoirs publics pour sauver 20 000 emplois de la SEMM Sud Aviation, constructeur historique de la Caravelle. Quel est le contexte de cette reconversion / diversification ? À cette époque, la France importe chaque année 100 à 150 milliards d'anciens francs de biens d'équipements. Ces importations sont rendues nécessaires par le fait que l'industrie privée, ne trouvant pas ses productions

assez rentables, ne s'intéresse pas à leur fabrication en France. Sud-Aviation entend, avec l'aide de l'État, jouer un rôle de pionnier dans ce domaine. Plusieurs pistes sont alors étudiées : production de machines-outils pour l'industrie automobile, fabrication de roulottes de camping, déminéralisation de l'eau de mer, séparation d'isotopes, et même... un pont sur la Manche. Il faudra attendre la fin de l'année 1960, pour que le directeur annonce la décision de la fabrication de caravanes. Avec la marque *Caravelair* (en hommage à la Caravelle), l'usine de Saint-Nazaire emboîte le pas à d'autres établissements du groupe, lancés plus tôt dans la diversification avec le lancement des téléviseurs *Teleavia* et des réfrigérateurs *Frigeavia*.

De cette histoire, intéressante à plus d'un titre, nous tirons quatre enseignements :

1. Sud-Aviation n'a pas arrêté de fabriquer des Caravelle<sup>383</sup>, mais a sauvé des emplois en valorisant son outil industriel, les compétences de ses employés et l'image de qualité associée à l'industrie aéronautique pour produire, localement et avec une double exigence de durabilité et de qualité, des biens jusqu'alors importés dont l'histoire se poursuit encore aujourd'hui<sup>384</sup>.
2. Les anciens salariés de l'aéronautique sont restés fiers de leur production, synonyme de qualité et d'innovation technique, transposant l'excellence aéronautique dans des produits à destination du grand public.
3. La stratégie de diversification ne s'est pas imposée immédiatement, mais à l'issue de tâtonnements.
4. Le soutien de l'État a joué un rôle déterminant.

Aujourd'hui, dans un contexte de crise sanitaire et alors que la préservation de l'emploi à long terme dans l'industrie dans sa forme actuelle est incompatible avec les objectifs écologiques, alors que le plan de relance européen entend encourager la (re) localisation d'industries stratégiques, ne devrait-on pas se poser la question d'utiliser une partie de l'appareil industriel aéronautique pour servir une politique de décarbonation portée par le Green Deal européen ? Le sujet mérite amplement une étude dédiée, mais nous souhaitons jeter ici quelques idées ouvertes pour initier un début de réflexion.

##### Impulser la diversification

Bien que la diversification présente le double avantage de pouvoir amortir tout ralentissement futur prolongé de la production (quelques en soient les raisons les raisons, climatiques, énergétique ou sanitaires) et utiliser le soutien financier des États comme une opportunité de repositionner l'industrie vers des activités non sinistrées et décarbonantes, la probabilité que le secteur entame ce virage de lui-même est extrêmement faible. Les grands donneurs d'ordre sont focalisés à court terme sur le maintien des compétences sur l'intégralité

382 Les zombies sont des entreprises dont le modèle économique n'est pas profitable et vivant sous perfusion d'investissement public ou privé. Ne pouvant plus investir, elles sclérosent l'économie en aspirant les capitaux qui pourrait être fléchés vers des secteurs plus porteurs. <https://www.lesechos.fr/idees-debats/editos-analyses/les-entreprises-zombies-grandes-ga-gnantes-de-lepidemie-1265994>

383 Dont la production s'est poursuivie jusqu'en 1973.

384 À travers notamment la marque Trigano, qui a racheté Caravelair en 1971.

de la chaîne de valeur<sup>385</sup>, et à long terme sur la décarbonation du secteur aérien par la voie technique. Difficile a priori pour Airbus, après avoir annoncé un avion à hydrogène pour 2035 à travers le programme ZEROe, qui va nécessiter des financements conséquents<sup>386</sup> et une coopération internationale accrue, de se lancer en parallèle dans une autre voie industrielle. Par ailleurs, si la préoccupation sociétale sur les impacts climatiques du transport aérien progresse en Europe, la prise de conscience n'a pas commencé dans le reste du monde où le marché aéronautique dépend fortement des énergies fossiles. Les avionneurs sont ainsi à l'affût des signes de reprise dans les régions du globe qui constituent leur plus gros marché, comme la Chine, où le trafic a déjà retrouvé son niveau d'avant-COVID<sup>387</sup>. Enfin, dans un monde duopolistique (pour l'instant !), toute ouverture à la diversification pourrait être interprétée par le marché comme un signe de faiblesse et créer un report vers la concurrence, actuelle ou future.

Du côté de la sous-traitance, les chances de diversification sont encore plus maigres. Comment imaginer que des PME, voire TPE qui ont, durant les dernières décennies, eu pour uniques clients les grands donneurs d'ordre ou des sous-traitants de rang supérieur, puissent du jour au lendemain se tourner vers d'autres marchés ? Si certaines entreprises auront les moyens de chercher des relais de croissance ou de diversification par elles-mêmes, la plupart d'entre elles restent mono-sectorielles, hyperspécialisées, dépourvues de R&D, et souffrent d'un manque de compétitivité qui, déjà avant la crise, leur faisait courir un risque de délocalisation<sup>388</sup>. Pour un.e dirigeant.e de PME, il n'y a sans doute pas d'autre choix que d'attendre la reprise et de tirer profit du plan de soutien pour se moderniser<sup>389</sup>.

Reste, in fine, la voix des actionnaires. Les plus gros actionnaires d'Airbus sont la France, l'Allemagne et l'Espagne qui, d'une part ne pèsent qu'à hauteur de 25% du capital, et d'autre part sont alignés sur la voix européenne concernant les différents plans de soutien aux industries stratégiques. Il faudrait donc que le reste des porteurs soit collectivement convaincu du risque de dépréciation des actifs face à la menace climatique. Ce mouvement semble s'amorcer chez cer-

tains fonds d'investissements qui, comme ce fût récemment le cas chez certaines majors du pétrole<sup>390</sup>, ont pour projet de porter des résolutions climat devant les assemblées générales d'actionnaires<sup>391</sup>.

Dans ces conditions, nous défendons l'idée qu'une diversification, même partielle, du secteur ne sera possible que si la puissance publique encourage les conditions d'une nouvelle aventure industrielle, et rende ces conditions suffisamment attractives pour l'ensemble des parties prenantes. Quels en seraient les critères ? Qu'est-ce qui donnerait envie aux acteurs qui souhaitent se diversifier de rejoindre cette nouvelle aventure ?

- La diversification doit pouvoir se faire **rapidement**, de manière à limiter au maximum les plans de restructuration dus à la crise COVID, amortir le choc de suppression de postes, éviter le chômage et/ou la perte de compétence, et prendre le relais des aides publiques de soutien au plus tôt.
- La diversification ne doit pas être perçue comme une contrainte supplémentaire, mais comme une opportunité à saisir, et la question de son **acceptabilité** par les parties prenantes est cruciale :
  - **Au niveau politique**, elle doit s'inscrire dans la continuité des plans de soutien actuels et des politiques publiques de relance à venir.
  - **Au niveau sociétal**, elle doit être perçue comme une réponse au choc infligé par la crise sanitaire, préparant « le monde d'après » dans une logique de transition écologique. Afin de favoriser la résilience des territoires, la décentralisation doit être davantage une force qu'une faiblesse.
  - **Au niveau des entreprises**, elle doit minimiser les modifications de statut juridique et si possible de modèle économique des entreprises en place, favoriser la (re) localisation et éviter au maximum les déplacements des sites de production, et par voie de conséquence des effectifs.
- Enfin, la diversification doit **être frugale**, en évitant le gaspillage de ressources (matières premières, énergie, capital humain et industriel, argent public) et en s'inscrivant dans une trajectoire de décarbonation compatible avec les objectifs de l'Accord de Paris.

## Une Alliance industrielle pour le climat

### Quelle forme concrète cette stratégie de diversification pourrait-elle prendre ?

Nous avançons ici une proposition qui découle de nos constats précédents, et dont l'implémentation concrète nécessiterait une étude de terrain approfondie. Rappelons encore une fois que nous n'avons pas la prétention de proposer une vision prospective de la transformation du secteur, mais que notre intention est uniquement de suggérer un récit industriel alternatif dans le seul but d'ouvrir la discussion.

385 Les compétences du secteur sont précieuses : on ne peut se permettre de les perdre. Un des objectifs du plan de soutien présenté en juin par le gouvernement est justement de sécuriser l'ensemble la chaîne de sous-traitance afin de pouvoir rebondir dans les meilleurs délais sitôt la crise sanitaire passée.

386 Dont une partie serait très certainement publique. Voir le budget SRIA : [https://www.clean-aviation.eu/files/Clean\\_Aviation\\_SRIA%20\\_20200630.pdf](https://www.clean-aviation.eu/files/Clean_Aviation_SRIA%20_20200630.pdf)

387 <https://www.lesechos.fr/industrie-services/air-defense/en-chine-le-traffic-aerien-a-retrouve-son-niveau-pre-covid-1265444>

388 <https://www.usinenouvelle.com/article/sous-traitants-francais-de-l-aero-attention-danger.N690314>

389 La région Occitanie a pourtant voté en juillet 2020 son propre plan de soutien au secteur aéronautique et spatial, doté de 100 M€, qui vise à favoriser l'innovation et la diversification des acteurs de la filière, et a annoncé en novembre 2020 la création du Pass Relance Aéronautique-Aérospatial. Dédié aux PME et ETI de moins de 500 salariés, il leur offrira, après réalisation d'un diagnostic qui aura permis d'identifier les leviers d'actions prioritaires, une aide d'un montant pouvant aller jusqu'à 60 K€ pour financer « des projets de diversification, de consolidation et d'amélioration de leurs performances ». Ce nouveau dispositif, qui devrait rester en vigueur jusqu'à la fin de l'année 2021 à minima, suffira-t-il pour les que entreprises concernées franchisse le pas de la diversification ? <https://forumeco.fr/de-nouvelles-aides-pour-la-filiere-aeronautique/>

390 <https://follow-this.org/total-and-cp100-respond-to-climate-targets-resolution/>

391 [https://www.lemonde.fr/economie/article/2020/12/13/le-fonds-acti-viste-tci-lance-la-chasse-au-greenwashing\\_6063206\\_3234.html](https://www.lemonde.fr/economie/article/2020/12/13/le-fonds-acti-viste-tci-lance-la-chasse-au-greenwashing_6063206_3234.html)

Pourquoi ne pourrait-on créer une Alliance industrielle, chargée d'implémenter une stratégie (nationale ou supranationale) de décarbonation et de renforcer la résilience et la compétitivité du tissu industriel français ? En se substituant aux grands donneurs d'ordre, l'Alliance déchargerait les sociétés qui souhaitent la rejoindre du poids de la diversification et ferait bénéficier les petites entreprises dépourvues de R&D de bureaux d'études distants et décentralisés. Par ailleurs, l'Alliance permettrait de mettre en commun les ressources industrielles sous-utilisées, afin de mutualiser les coûts de transformation vers une industrie plus compétitive et de reconfigurer rapidement l'appareil productif en cas d'aléas. En mettant le savoir-faire aéronautique au service de la lutte contre le changement climatique, l'Alliance se positionnerait ainsi comme un acteur manufacturier de premier plan pour la décarbonation de la France (ou encore mieux, de l'Europe) et participerait à l'effort de (re)localisation industrielle souhaitée par le gouvernement. Implémentation concrète du Green Deal européen, l'Alliance répondrait ainsi au double enjeu d'accroître à la fois la résilience et la compétitivité de l'industrie européenne. Elle pourrait, par exemple, prendre la forme d'un GIE, structure juridique qui était celle d'Airbus à sa création et qui a justement permis de *renforcer la coopération européenne dans le domaine de l'aviation et de promouvoir le progrès économique et technologique en Europe*<sup>392</sup>. Cette proposition rejoint justement celle d'une tribune récemment publiée par des salariés du secteur, inquiets de son avenir<sup>393</sup>. Elle présente l'avantage de pouvoir être mise en œuvre rapidement, d'accorder une relative liberté à l'industrie tout en préservant le rôle de l'État comme garant des objectifs de décarbonation.

#### Les missions de l'Alliance pourraient être multiples :

- Elaborer et conduire de grands programmes d'équipements et de services pour décarboner l'économie et lutter contre le dérèglement climatique.
- Collecter des financements publics & privés, en fournissant la garantie que les fonds sont bien utilisés pour servir un objectif de décarbonation<sup>394</sup>.
- Agir comme grand donneur d'ordres aux entreprises souhaitant se reconvertir ou se diversifier, offrir un écosystème de type pépinière aux jeunes entreprises axées sur la décarbonation.
- Utiliser, durant les périodes de crise, les compétences des salariés et les outils industriels à l'arrêt pour les

réorienter vers les secteurs en demande<sup>395</sup>.

- Conduire des analyses de relocalisation stratégique, identifier les nouveaux produits ou nouvelles attentes de consommation.

#### Du côté de la production, les options ne manquent pas.

Par exemple, dans quelle mesure l'Alliance pourrait-elle exploiter les savoir-faire et les infrastructures du secteur aéronautique pour concourir au développement de la filière hydrogène ? À quelles conditions la fabrication de réservoirs d'hydrogène liquide ou haute pression, de piles à combustible, d'électrolyseurs, de systèmes de régulation et d'alimentation des flux, de couplage à des systèmes de batterie, de système de contrôle et de supervision garants de la sûreté, est-elle accessible à l'industrie aéronautique ?

Dans quelle mesure également les compétences et les chaînes logistiques de l'aéronautique peuvent être utilisées pour la fabrication d'éoliennes, notamment off-shore ? Leur fabrication requiert des compétences en aérodynamique, calculs de structure, matériaux composites ; rien d'insurmontable a priori pour les industries de la filière, habituée de longue date à l'industrialisation, l'assemblage et le transport d'éléments de très grande dimension.

L'idée de reconvertir la filière vers la production d'énergie bas-carbone est d'ailleurs déjà en chemin, puisque Rolls Royce vient d'annoncer vouloir créer 6 000 emplois d'ici 2030 grâce au développement de petits réacteurs nucléaires<sup>396</sup>, dont 80% pourraient être fabriqués dans les usines du groupe avant transfert vers des sites nucléaires existants. Le groupe parle même de 34 000 emplois d'ici à 2035 si le gouvernement du Royaume-Uni prend un engagement clair pour permettre la construction des 16 SMR<sup>397</sup>. Ce type de projet semble toutefois mieux engagé chez nos voisins d'outre-manche que chez nous : si la France consacre quelques dizaines de millions d'euros de son plan de relance au développement d'un SMR, le Royaume-Uni pourrait mettre 2 milliards de livres sur la table<sup>398</sup>.

Dans quelle mesure l'Alliance pourrait-elle par ailleurs fabriquer des biens d'équipement en rapport avec l'énergie des logements ? La production de pompes à chaleur, chauffe-eau solaires, ballons thermodynamiques, éléments de géothermie (extraction et distribution) ne devrait pas poser de difficulté particulière à la filière aéronautique, qui utilise déjà des systèmes hydrauliques, de chauffage et d'air conditionnés dans les cabines, avec des contraintes thermiques importantes.

392 Le Mission Statement d'Airbus à sa création est ainsi explicite : "For the purpose of strengthening European co-operation in the field of aviation technology and thereby promoting economic and technological progress in Europe, to take appropriate measures for the joint development and production of an Airbus." Voir Airbus History, Flight International, Reed Business Publishing, 1997.

393 <https://blogs.mediapart.fr/les-invites-de-mediapart/blog/080121/le-secteur-aeronautique-en-crise-peut-il-sauver-le-climat-pour-un-airbus-du-climat>

394 L'activité industrielle de l'Alliance, contribuant à la décarbonation de l'économie en général, pourrait être valorisée en crédits carbone injectables dans les systèmes de compensation comme CORSIA et donc, in fine, s'inscrire dans un cercle vertueux pour le transport aérien.

395 C'est d'ailleurs l'objectif du dispositif Passerelle Industrie, mis en œuvre en Occitanie par France Industrie, l'UIMM et Pôle emploi. Effectif depuis octobre, il permet de mettre en relation des salariés d'entreprises qui connaissent des baisses d'activité avec des entreprises d'autres secteurs qui ont des besoins de recrutement ou de compétences. <https://www.franceindustrie.org/france-industrie-occitanie-lance-le-dispositif-passerelles-industries/>

396 Small Modular Reactors (SMR).

397 Small Modular Reactors. Petits réacteurs modulaires, voir [https://fr.wikipedia.org/wiki/Petits\\_r%C3%A9acteurs\\_modulaires](https://fr.wikipedia.org/wiki/Petits_r%C3%A9acteurs_modulaires)

398 <https://www.usinenouvelle.com/article/rolls-royce-affirme-pouvoir-creer-6-000-emplois-au-royaume-uni-grace-aux-petits-reacteurs-nucleaires.N1027454>

Dans quelle mesure enfin l'Alliance pourrait-elle encourager le développement d'une filière locale de recyclage des avions à grande échelle, capable d'endurer la cadence de retrait des anciens appareils et de rediriger les matières vers d'autres secteurs que l'aéronautique, et ainsi sécuriser l'approvisionnement d'industries dépendantes de ressources en cuivre, aluminium, alliages complexes, composites carbone ?

Relever ces défis nécessite en premier lieu une adaptation de l'outil industriel. En mobilisant les ressources productives sous-utilisées de l'aéronautiques (ingénierie, production, logistique, moyens généraux), l'Alliance devrait organiser la modernisation de la filière, transformation que les petits acteurs du secteur pourront entreprendre d'autant plus sereinement qu'ils seront accompagnés par une structure les protégeant. Adaptation des procédés pour plus de réactivité (agilisation), homogénéisation et harmonisation du pilotage des ressources de l'Alliance via un système d'information commun s'inscrivant dans une stratégie d'indépendance numérique de la France, adaptation de l'outil industriel, fabrication de machines-outils bénéficiant des dernières innovations technologiques<sup>399</sup>... Ce sont là projets d'envergure que les PME ne peuvent mener seules.

On ne saurait, par ailleurs, laisser de côté la question des marchés sur lesquels l'Alliance opèrerait : Projets de diversification ou de reconversion portés par des PME du secteur aéronautique, projets de startups régionales, ordres de fabrication d'autres secteurs moins touchés par la crise (structures métalliques, procédés industriels, pièces d'électroménager, pompes à chaleur, chauffage, industrie ferroviaire), commandes publiques de mobilier urbain, d'équipements hospitaliers... **Ce ne sont certainement pas les idées qui manquent, mais l'Alliance ne verra pas le jour sans volonté affirmée des états et collectivités locales. Ceux-ci auront un triple rôle à jouer :**

**1. Accompagnement à la transformation.** L'État pourrait ainsi organiser une concertation, éventuellement assortie de débats publics, avec l'ensemble de la filière, afin d'évaluer la faisabilité de la reconversion, d'identifier les acteurs susceptibles de rejoindre l'Alliance et d'enclencher une dynamique de (re)construction industrielle. Dans un second temps, l'État pourrait créer un fond de financement de la transformation et faciliter son accès aux entreprises membres de l'Alliance. En parallèle, l'État pourrait proposer un accompagnement renforcé des employés de l'aérien qui souhaitent se reconvertir individuellement, par exemple en offrant, en guise d'alternative au chômage partiel, des prises en charge de formations de longue durée pour les employés quittant le secteur.

**2. Stimulation de la demande,** via une orientation politique soutenant une demande forte dans des secteurs verts et accessibles à l'Alliance. Ce soutien pourra se traduire, en guise d'exemples, par l'ouverture immédiate de nombreux appels d'offres (champs d'éoliennes flottantes ou posées, développement d'un réseau national de transport et stockage d'hydrogène, par exemple) ou un renforcement des dis-

positifs fiscaux d'encouragement à la rénovation thermique.

**3. Encadrement réglementaire.** L'État devra enfin promouvoir une approche européenne, dans le respect des règles de l'Union, quitte à renégocier avec les états membres si besoin, tout en promouvant une réglementation forte sur la qualité<sup>400</sup> et la durabilité de la production de l'Alliance afin de favoriser l'industrie européenne.

## 9.5 Conclusion

Cette dernière partie soulève plus de questions qu'elle n'apporte de réponses, et nécessiterait amplement une étude à part entière. Mais, puisque nous abordons le sujet de la sobriété dans un secteur aussi intense en énergie que l'est le transport aérien, nous ne pouvons éluder le thème de l'emploi. **Notre position est donc la suivante : pour l'industrie aéronautique, se diversifier apparaît désormais comme une politique raisonnée de développement durable, et cette politique doit prévoir la question de sa gouvernance, c'est-à-dire une manière d'ouvrir un dialogue collectif autour des transformations de l'industrie.** À plus court terme, les dispositifs exceptionnels d'activité partielle ne pourront sans doute pas perdurer si le trafic ne reprend que dans 4 ou 5 ans. Travailler sur une reconversion intelligente et à grande échelle d'une portion des emplois du secteur est aussi une manière d'enrayer la hausse du chômage, sans pour autant sacrifier l'industrie aéronautique. Bien au contraire, il s'agit d'accroître sa résilience et lui permettre d'assurer son rôle dans un monde bas-carbone. Cette position est défendue par de nombreux salariés du secteur et des habitants de la région Occitanie<sup>401</sup>.

Dans le cadre de la stratégie française de décarbonation, la prospective emploi est guidée par deux outils que sont la Stratégie nationale bas carbone (SNBC) et la Planification pluriannuelle de l'énergie (PPE). Leur scénario de référence pour la décarbonation de la France prévoit un transfert des emplois des secteurs intenses en énergie vers les secteurs les plus à même de se décarboner. Les organismes compétents pour instruire le sujet ne manquent pas : France Stratégie, l'ADEME, le CEREQ, l'Observatoire national des emplois et métiers de l'économie verte figureront certainement parmi les acteurs d'une réflexion de fond. Un nouveau travail doit maintenant s'engager, sans doute en partenariat avec les organismes suscités et s'appuyant sur les instruments méthodologiques d'analyse comme les monographies d'entreprise et CV de sites, pour accompagner la filière dans son voyage vers le monde bas-carbone de demain.

<sup>399</sup> La filière aéronautique conçoit et fabrique déjà ses propres outillages, et a une expérience de diverses machines-outils très pointue.

<sup>400</sup> Par exemple sur la rénovation énergétique des bâtiments, ou sur le transport urbain décarboné et sans pollution atmosphérique en Europe.

<sup>401</sup> À titre d'exemple, on citera le collectif ICARE et l'ATELier d'ECologie POLitique (ATECOPOL).

## 10 Aller plus loin

Le sujet de la pérennité du secteur aérien dans un monde bas carbone est vaste et, en dépit de notre souhait de couvrir largement la problématique, il demeure d'autres axes d'études et d'autres questions connexes qui méritent d'être approfondis. Nous pourrions citer, entre autres :

- Une étude des impacts économiques et des hypothèses de financement des différents scénarios
- Les prérequis concernant l'utilisation de ressources autres que l'énergie et les carburants
- L'impact émissif des organisations Hub & Spokes, par opposition à un modèle point à point.

- La part grandissante du fret aérien et son adhésion aux choix de nos sociétés mondialisées.

- La possibilité de budgets carbone ventilés par pays, contribuant à l'idée d'une transition la plus acceptable possible trouvant le juste équilibre entre pays développés et en voie de développement, dont les taux de croissance du trafic aérien sont significativement différents.

- ...

**Ces différents sujets ouvrent de nouvelles perspectives de réflexion qui pourront faire l'objet de nouveaux développements de ce rapport.**

## 11 Conclusion

La limitation de nos émissions de GES et l'adaptation de nos sociétés aux conséquences du changement climatique sont une priorité de premier ordre. Le consensus scientifique, incarné par le GIEC, définit le budget carbone comme métrique essentielle permettant d'évaluer l'effort de transformation nécessaire et nos marges de manœuvre dans un objectif climatique donné.

Définir un budget carbone sectoriel est donc un choix politique, préalable à l'élaboration de trajectoires de réduction des GES.

**Si l'innovation technologique est essentielle à la décarbonation du transport aérien, nous n'identifions aujourd'hui aucune trajectoire, aucun scénario crédible s'insérant dans un budget carbone « 2°C », qui ne soit accompagnée d'une limitation de la croissance du trafic, qu'elle soit subie, naturelle ou volontaire.**

Les scénarios théoriques les plus optimistes que nous avons étudiés s'abstraient volontairement des contraintes liées aux externalités financières ou énergétiques, des risques importants qui pèsent sur l'approvisionnement en carburants alternatifs, ou la disponibilité des infrastructures aéroportuaires. **Même dans ces scénarios, les innovations technologiques arrivent trop tard et se déploient trop lentement dans les flottes commerciales dans les hypothèses de trafic d'avant la crise COVID.**

Il faut alors soit augmenter le budget, soit revoir à la baisse les hypothèses de trafic. Le budget carbone global, tous secteurs confondus, n'étant pas arbitrageable, augmenter celui du transport aérien fera l'objet d'une négociation intersectorielle à l'issue incertaine, au vu de la concurrence d'accès aux ressources bas carbone, et ce sans même considérer la question de la criticité de l'aviation comparée à celles d'autres services vitaux.

**Dès lors, une réflexion sociétale sur le rôle prioritaire de l'aviation dans un monde bas carbone est la meilleure façon d'intégrer la contrainte climatique dans un vrai projet de transformation, plus sobre en usage.** Elle ouvre la voie à une

législation et une fiscalité acceptable, donnant au transport aérien des perspectives sur le long terme et laissant le temps à l'innovation technologique décarbonante de faire son œuvre.

**La difficulté majeure de cette situation réside en son financement.** En effet, les investissements massifs pour accélérer l'arrivée et le déploiement de l'innovation décarbonante doivent être déployés en parallèle de la maîtrise du trafic pour tenir le budget carbone (et donc diminuer les sources de revenus qui prévalaient jusqu'alors), le tout sur fond de crise sanitaire qui, pour l'instant, absorbe la manne publique.

Si ce sont les gouvernements qui investissent, alors le secteur aérien sort un peu plus de son propre monde, et se retrouve une nouvelle fois dépendant de la question des priorités citoyennes et des arbitrages budgétaires. Comme en témoignent les plans de soutien au secteur aérien, maintenir les emplois, la compétence et la souveraineté nationale dans le secteur aérien est affiché aujourd'hui comme une priorité en France comme dans d'autres pays.

Mais la situation pourrait évoluer et les financements pourraient ne pas être suffisants pour maintenir à la fois les emplois et la trajectoire carbone dans un contexte baisse du trafic aérien, subie ou volontaire. Il semble alors essentiel **d'anticiper la contraction du secteur et d'explorer toutes les pistes de diversification.** L'industrie aéronautique contribuerait ainsi à la transformation en profondeur du secteur, en lui garantissant un avenir sur le long terme, et pourrait de plus mettre son savoir-faire, son outil industriel, et son esprit de pionnier au service de la décarbonation globale de l'économie.

Le transport aérien fait partie du monde moderne. Il relie les peuples, il continue de nous faire rêver, de nous faire grandir. Sortir des caricatures et des positions corporatistes pour regarder la situation avec le plus de lucidité possible dans le cadre contraint du changement climatique est, selon nous, le meilleur service que nous pouvons lui rendre. C'est en tout cas l'ambition de ce rapport.

## 12 Un mot du Directeur Général de l'ISAE-SUPAERO

**Le rapport a été transmis en pré-lecture à différents acteurs du secteur aérien pour commentaire. L'ISAE-SUPAERO, par la voix de son Directeur Général Olivier Lesbre, s'est prêtée à l'exercice, et nous l'en remercions vivement et sommes heureux de présenter son texte :**

L'impact du transport aérien sur le réchauffement climatique est mis en avant dans les médias depuis quelques années, en s'appuyant souvent davantage sur des idées simples ou des convictions morales que sur des analyses scientifiques. Ces derniers mois, avec la crise de l'aéronautique déclenchée par le Covid, le débat sur la transition écologique du transport aérien s'est intensifié et approfondi, et a commencé à prendre un tour plus pragmatique, grâce à la mobilisation croissante des ingénieurs sur le sujet. En tant que grande école d'ingénieurs aéronautiques, l'ISAE-SUPAERO s'en félicite.

L'essai "Pouvoir voler en 2050" en est une illustration. Il a été rédigé à l'initiative du collectif SUPAERO-DECARBO, qui réunit depuis deux ans des alumni et des élèves de l'Institut qui se mobilisent pour réduire l'impact du secteur aéronautique sur le climat. Il s'appuie sur les connaissances scientifiques disponibles pour faire des propositions sur l'avenir du secteur aérien compatibles avec les accords de Paris sur le climat.

Comme l'essai le met bien en évidence, de nombreuses incertitudes pèsent sur les prévisions relatives à l'évolution des émissions, ce qui conduit les auteurs à faire des hypothèses et à identifier des choix qui seront dimensionnants pour l'avenir. Deux d'entre eux méritent en particulier discussion :

Le premier porte sur la part du « budget carbone de l'humanité » que l'on peut consacrer à l'aviation (ou autrement dit aux voyages à grande distance) entre 2020 et 2050. Cet essai fait le choix de la prendre égale à la part de l'aviation dans les émissions globales de 2019, tout en reconnaissant qu'il s'agit d'un choix arbitraire. C'est en fait un choix dimensionnant sur les conclusions de ce travail, et c'est un choix de nature politique. Or la plupart des économistes considèrent que ce n'est pas le meilleur pour réduire globalement les émissions, dans la mesure où pour être efficace, il faut d'abord s'attaquer aux secteurs où c'est le plus facile, comme la production d'électricité, ce qui conduit mécaniquement à laisser augmenter la part relative des secteurs où c'est plus difficile, comme l'aviation.

Le second concerne le rythme du progrès technologique. La tendance naturelle est de l'extrapoler à partir du passé. Cependant, la vitesse à laquelle les premiers vaccins anti-Covid ont été développés vient de démontrer de façon éclatante que ce rythme s'accélère fortement quand la communauté internationale des scientifiques et des ingénieurs compétents se focalise sur un problème urgent.

L'Institut a bon espoir que le même phénomène soit en train de se produire pour la décarbonation de nos sociétés en général et du transport aérien en particulier. Pour sa part, il s'engage résolument dans ce sens, en formant des ingénieurs capables de mener la transition écologique du secteur dans toute sa complexité, en mettant le sujet au cœur de ses activités de recherche et en contribuant également au débat public.

En conclusion, l'Institut salue cette contribution de certains de ses élèves et de ses anciens à un débat public rationnel et structuré. Le point de vue exprimé est solidement argumenté, mais, comme tout travail prospectif, repose sur des hypothèses dont certaines sont contestables et doivent encore faire l'objet de discussions approfondies. Nul doute que ce travail contribuera à faire progresser la qualité du débat sur l'avenir du transport aérien !

PS : l'Institut vient de mettre en ligne un outil ouvert à tous qui permet à chacun de simuler l'impact sur le réchauffement climatique des différentes hypothèses que l'on peut faire sur l'évolution de l'aviation. Cet outil devrait naturellement intéresser les lecteurs de ce rapport, et est disponible à l'adresse [cast.isae-supaero.fr](http://cast.isae-supaero.fr)

**Olivier Lesbre**

## 13 Annexes

### 13.1 Annexe 1: Idées recues sur les carburants alternatifs

#### 13.1.1 “Les biocarburants sont en compétition avec l’agroalimentaire et nécessitent de la déforestation” : VRAI et FAUX (selon le biocarburant)

Il existe différents types de biocarburants classés selon leur processus de fabrication et la matière première utilisée.

Les biocarburants dits de première génération sont ceux produits à partir d’huiles végétales et céréalières. Ils requièrent donc une surface agricole importante qui peut nécessiter de la déforestation et sont directement en compétition avec l’agroalimentaire. Ce sont les plus développés et commercialisés aujourd’hui et leur pourcentage d’utilisation est régulé : pour les transports en Europe (régulation RED II) il doit être inférieur à 7% en 2020, taux qui sera abaissé à 3,6% en 2030<sup>402</sup>. L’objectif de l’OACI de 63% de réduction de CO<sub>2</sub> grâce à l’utilisation de 100% de SAF<sup>403</sup> est calculé sur la base des biocarburants de deuxième génération.

Les biocarburants dits de deuxième génération sont ceux issus d’autres matières premières, produits à base de matière cellulosique : des cultures énergétiques dédiées (toute la plante est utilisée donc la surface nécessaire est plus faible), des déchets agricoles ou forestiers ou encore des déchets municipaux organiques ou des graisses animales. Ils ne sont pas en compétition directe avec l’alimentaire puisque la matière première n’est pas comestible et limitent l’utilisation des sols, ce qui implique un faible besoin de déforestation. Une fois enlevées les surfaces nécessaires à l’habitation, à l’agriculture et les surfaces inexploitable, il resterait sur terre d’ici 2050, 1,41 GHa (soit 10%) de terres utilisables pour l’expansion non-agricole telle que la bioénergie<sup>404</sup>.

Les biocarburants de troisième génération, au stade de recherche exclusivement actuellement, sont produits à base de micro-organismes par photosynthèse ou fermentation (levures et algues). À un stade de développement encore non commercialisable, ils permettraient de réduire drastiquement les surfaces agricoles nécessaires malgré une très grande consommation d’eau, les rendant donc sujet à controverse. *Leur environnement (température, luminosité, ressources) doit être également contrôlé, ce qui nécessite une importante dépense énergétique*<sup>405</sup>.

#### 13.1.2 “Les biocarburants ont un impact carbone pire que le kérosène” : FAUX pour la majorité

Afin de mesurer correctement l’impact carbone d’un carburant, il faut mesurer les flux de carbone lors de chacune des étapes du cycle de vie de carburant : de son extraction/sa plantation jusqu’à sa combustion. L’impact carbone provient donc du carbone émis lors des autres étapes de sa vie : potentiellement la déforestation, la transformation et le transport.

Les biocarburants avec un fort impact carbone sont ceux qui ont été produits sur des terres issues de la déforestation et particulièrement la déforestation de forêts primaires qui sont les plus grands puits de carbone. Par exemple, pour un biocarburant issu de l’huile de palme, alors que ses émissions de CO<sub>2</sub> liées à la culture, au transport, et à l’industrie cumulées sont réduites de 66% par rapport aux émissions de kérosène (30gCO<sub>2</sub>/MJ contre 87gCO<sub>2</sub>/MJ pour le kérosène<sup>406</sup>), la prise en compte du changement de l’utilisation des terres augmente ce score à 105,3gCO<sub>2</sub>/MJ, soit des émissions plus importantes de 21% par rapport à celles du kérosène.

Ces effets de la déforestation peuvent s’appliquer à tous les biocarburants de première génération et aux cultures énergétiques en cas de déforestation. Néanmoins le besoin en surface au sol est bien moindre pour les biocarburants de seconde génération.

Les déchets agricoles/forestiers et les graisses animales sont, eux, produits quoi qu’il arrive et ne nécessitent pas de changement direct d’utilisation des terres (les résidus émettent 8 à 11gCO<sub>2</sub>/MJ sur l’intégralité de leur cycle de vie soit huit fois moins que le kérosène) : aucune déforestation n’est donc nécessaire.

Cette assertion est donc fautive si la culture des biocarburants est régulée et que des biocarburants de deuxième génération sont utilisés.

#### 13.1.3 “Les émissions « hors CO<sub>2</sub> » des biocarburants sont pires que celles du kérosène” : Plutôt VRAI

Lors de la combustion, les carburants, que ce soit le kérosène ou les biocarburants, n’émettent pas que du CO<sub>2</sub> dans l’atmosphère (cf. 5.7.2)

Une étude du MIT<sup>407</sup> a cherché à quantifier ces impacts des émissions « hors CO<sub>2</sub> » qui ont lieu lors de la combustion de

402 International Council on Clean Transportation, The European Commission’s renewable energy proposal for 230, Janvier 2017

403 ICAO, Sustainable Aviation Fuels Guide, Décembre 2018

404 Sustainable Aviation Fuels Guide, ICAO, 2018

405 The industrialization Possibility of Micro Algae Fuel in China, accessible via [https://www.bio.org/sites/default/files/legacy/bioorg/docs/TUES\\_PLAZABC\\_The%20Industrialization%20Possibility%20of%20Microalgae%20Fuel%20in%20China%20-Yang.pdf](https://www.bio.org/sites/default/files/legacy/bioorg/docs/TUES_PLAZABC_The%20Industrialization%20Possibility%20of%20Microalgae%20Fuel%20in%20China%20-Yang.pdf) Zongxin Yang

406 European Commission, Sustainability and Deployment Strategies for SAF. Communication paper (deliverable D1.1.4), Feb 2019 - Table 3

407 Russell W. Stratton, Philip J. Wolfe, and James I. Hileman, Impact of Aviation Non-CO<sub>2</sub> Combustion Effects on the Environmental Feasibility of Alternative Jet Fuels, 2011

carburants alternatif. Sur une fenêtre temporelle de 100 ans, l'étude montre que les impacts climatiques des produits non-CO<sub>2</sub> émis lors de la combustion des avions équivaut à l'émission de 78,1 gCO<sub>2</sub>e/MJ (pour rappel : 73,2 gCO<sub>2</sub>/MJ sont émis directement).

Par rapport au kérosène classique, l'utilisation d'un biocarburant élimine les sulfates et augmente la vapeur d'eau, ce qui entraîne un réchauffement. Dans le même temps, elle réduit les NOx et la suie, ce qui entraîne un refroidissement. Mais en considérant des périodes entre 100 ans et 500 ans, la réduction des NOx entraîne au contraire un léger effet de réchauffement. L'étude montre ainsi que les impacts climatiques des produits non-CO<sub>2</sub> de combustion des avions au biocarburant équivalent à l'émission de 85,7 gCO<sub>2</sub>e/MJ. D'après les résultats de cette étude, les émissions non-CO<sub>2</sub> des biocarburants seraient donc de près de 10% supérieures à celles du kérosène, en grammes de CO<sub>2</sub> équivalents. Cependant, d'autres études sont en cours à ce sujet et pourraient apporter de nouvelles conclusions.

### 13.1.4 “Les biocarburants ne seront jamais disponibles en quantité suffisante pour fournir le secteur de l'aviation” : hypothèse probable

D'après la demande en énergie de l'aviation en 2050 donnée par le rapport 2019 de l'OACI<sup>408</sup>, l'aviation aurait besoin de quatre fois plus d'énergie que ce que les biocarburants de première génération seraient capables de fournir sur la base des surfaces agricoles actuelles. Ceux-ci ne seront donc jamais en quantité suffisante pour fournir le secteur de l'aviation.

Les biocarburants de deuxième génération permettraient quant à eux, de couvrir les besoins en énergie de l'aéronautique de 2050. En effet, l'aéronautique utiliserait près de 60% de leur énergie disponible dans le scénario P2 du GIEC (90Mha de surfaces cultivables), et 85% dans le scénario P1 (20Mha de surfaces cultivables). La demande en énergie de l'aviation en 2050 serait ainsi du même ordre de grandeur que ce que les biocarburants 2ème génération seraient capables de fournir.

Il est alors important de noter que cette énergie est disponible pour l'ensemble du secteur de l'énergie, et pas uniquement pour l'aviation. De fait, les matières premières non-utilisées de manière directe ou indirecte par l'alimentaire peuvent être utilisées pour différents secteurs de l'énergie comme le chauffage, le transport ou l'électricité. Au regard des projections actuelles de croissance du trafic aérien mais aussi de la demande globale en énergie, un arbitrage sur l'utilisation de cette ressource est à réaliser, à commencer par sa répartition entre les différents modes de transports, ce qui rend peu probable l'utilisation de 100% de biocarburant pour le secteur aérien en 2050. Ceci justifie le besoin de développer en parallèle différents carburants alternatifs tels que les PtL ou Hydrogène.

### 13.1.5 “Tous les avions actuels peuvent voler avec 100% de carburants alternatifs” : FAUX

La possibilité d'utilisation d'un carburant dans un moteur dépend des caractéristiques de ce dernier. Certains carburants alternatifs, appelés “drop-in”, peuvent être incorporés “tels quels” dans les avions, sans avoir à effectuer des modifications technologiques des avions existants et des infrastructures aéroportuaires. C'est le cas des mélanges kérosène - carburants de synthèse (Power-to-liquids) mais aussi de mélanges de biocarburants - kérosène.

Ainsi, le taux d'incorporation d'un carburant alternatif dépend de ses propriétés. Actuellement, le taux d'incorporation maximum des carburants drop-in est de 50%. La nécessité de couplage au kérosène provient entre autres de la technologie actuelle des joints du moteur. Il faut conserver dans le mélange final certains composés chimiques pour éviter des problèmes d'étanchéité (les composés aromatiques) absents de la majorité des carburants alternatifs drop-in.

Quant à l'hydrogène, son utilisation nécessite une modification structurelle des avions actuels pour des problématiques de stockage en particulier.

Les avions actuels ne peuvent donc pas voler avec 100% de carburants alternatifs. Une modification du couple avion-moteur, ou de la composition des carburants alternatifs, est nécessaire pour arriver à cet objectif.

Ainsi, un taux d'incorporation des biocarburants de 100% pourrait être envisagé en couplant les huiles pyrolysées, contenant de nombreux aromatiques, avec d'autres carburants alternatifs n'en contenant pas. Une amélioration technologique pourrait également permettre d'utiliser des carburants contenant moins de composés aromatiques, et d'ainsi augmenter leur taux d'incorporation.

Ces contraintes font partie des éléments structurant la roadmap avion proposée en 7.2.2.2

### 13.1.6 “Si les carburants alternatifs ne sont pas commercialisés, c'est parce qu'ils coûtent trop cher à produire” : VRAI et FAUX

Les carburants alternatifs sont effectivement plus chers à produire que le kérosène<sup>409 410 411 412 413 414</sup>, avec des coûts com-

408 ICAO, ICAO global environmental trends – present and future aircraft noise and emissions, Juillet 2019

409 J. A. Hayward, D. A. O'Connell, R. John Raison, The economics of producing sustainable aviation fuel: a regional case study in Queensland, Australia, 2015

410 Ramboll, Sustainable Aviation Biofuel Status 2017, 2017

411 E. C. Wormslev, J. L. Pedersen, C. Eriksen, Sustainable jet fuel for aviation - Nordic perspectives on the use of advanced sustainable jet fuel for aviation, 2016

412 H. F. A. Elhaj, A. Lang, The worldwide production of bio-jet fuels - The current developments regarding technologies and feedstocks, and innovative new RD developments, October 2014

413 N. Pavlenko, S. Searle, A. Christensen, The cost of supporting alternative jet fuels in the European Union, March 2019

414 IATA 2014 Report on Alternative Fuels

pris entre 1,02 \$/L et 4,17 \$/L selon le type de carburant, au lieu de 0,47 \$/L actuellement pour le kérosène (McKinsey<sup>415</sup>). Ces coûts estimés sont actualisés et prennent en compte les coûts des matières premières, les dépenses d'investissements et les dépenses de fonctionnement nécessaires.

Cependant, d'après une enquête menée par l'IRENA auprès des principaux investisseurs dans les carburants alternatifs d'Europe, du Brésil, de Chine et d'Amérique du Nord sur les perspectives de développement de l'industrie et les principaux obstacles au déploiement, ce ne sont pas les coûts de production qui freinent le développement de ces carburants. Le principal obstacle au développement de ces solutions est en fait la réglementation, incertaine et instable<sup>416</sup>. Une réglementation favorable au secteur permettant un engagement à long terme rassurerait les investisseurs et les acteurs de l'industrie.

De même, ces incertitudes sur le prix des carburants alternatifs sont à mettre en parallèle avec celui du kérosène qui subit une très forte volatilité<sup>417</sup>.

### 13.1.7 “L'utilisation de l'hydrogène est sans émissions” : FAUX

L'utilisation de l'hydrogène en tant que carburant aéronautique n'a de sens que si sa production est réalisée à partir d'énergie faiblement carbonée (EnR notamment). Le générer à l'aide d'une énergie fossile serait totalement contre-productif puisque cela diminuer le rendement global dans une chaîne comprenant de la combustion fossile. Les émissions de CO<sub>2</sub> seraient alors augmentées sur l'ensemble du processus.

Notons également que l'utilisation d'énergies renouvelables pour la production d'hydrogène (et de synfuels) implique une très forte multiplication de ces sources disponibles sur la planète. Faire voler par exemple 40% des appareils au LH2 en 2050 nécessiterait jusqu'à 1500GW de puissance installée, soit 60% de la capacité actuelle (3 fois plus pour les synfuels captant du CO<sub>2</sub> dans l'air)<sup>418</sup>. Le tout sachant que d'importantes modifications réseau seraient nécessaires et que l'aérien n'est pas le seul secteur souhaitant utiliser ce type de carburant.

C'est donc bien en considérant la chaîne globale qu'il faut quantifier les réductions des émissions liées à l'utilisation de l'hydrogène. En prenant également en compte les effets hors-CO<sub>2</sub> (l'hydrogène relâche notamment 2.5 fois plus d'eau que le kérosène lors de sa combustion, mais 70% de NOx en moins), la combustion directe de l'H<sub>2</sub> permettrait de réduire les émissions de 50% à 75% et l'utilisation de piles à combustible de 75% à 90% (réduction des traînées de condensation liée à une

gestion des produits rejetés)<sup>419</sup>.

Les émissions et les externalités associées à la production d'hydrogène sont intégrées dans les calculs des « Scenarios convergents » en 7.2.3

### 13.1.8 “Une production verte d'hydrogène permettrait un trafic aérien sans impact environnemental” : FAUX

Si l'utilisation de l'hydrogène permet de supprimer les émissions de CO<sub>2</sub> générées en combustion par le trafic aérien, il est nécessaire hors CO<sub>2</sub>. Il reste à ce jour beaucoup d'incertitudes sur le sujet, mais ils pourraient représenter 2 à 8 fois les effets du CO<sub>2</sub>. Le tableau ci-dessous résume l'évolution des émissions en comparaison avec le kérosène<sup>420</sup>.

L'utilisation d'une pile à combustible ne génère pas de NOx (affectant la couche d'ozone) tandis que la combustion directe de l'hydrogène diminue grandement la valeur émise par le kérosène.

Que ce soit à partir de la combustion directe de l'hydrogène ou de la pile à combustible, les émissions de vapeur d'eau sont multipliées par un coefficient de 2,55 en comparaison avec le kérosène (la captation des émissions de vapeur d'eau via la technologie de pile à combustible est toutefois envisageable technologiquement, mais elle pose des problèmes de masse).

Les traînées de condensation apparaissent à haute altitude quand l'air est extrêmement froid (à -40°C) avec des gaz d'échappement chauds. L'effet des traînées de condensation, dans le cas de la pile à combustible, est considéré comme plus faible étant donné qu'il serait possible de collecter les vapeurs d'eau et de les conditionner.

Tableau 20 - Tendance des émissions hors CO<sub>2</sub> pour les technologies hydrogène

|                                          | CO <sub>2</sub> | NOx | Vapeur d'eau | Traînées de condensation |
|------------------------------------------|-----------------|-----|--------------|--------------------------|
| <b>Combustion directe de l'hydrogène</b> | 0               | ↓↓  | ↑            | ↓±                       |
| <b>Pile à combustible</b>                | 0               | 0   | ↑±           | ↓↓                       |

415 A. Dichter, K. Henderson, R. Rediel, D. Rieffer, How airlines can chart a path to zero-carbon flying, McKinsey Company, 2020

416 D. Gielen, S. Oksanen, Advanced Aviation Biofuels: ready for take-off?, 2019

417 L'Union Européenne risque de subir des contraintes fortes sur les approvisionnements pétroliers d'ici à 2030, The Shift Project, 2020

418 Clean Sky 2, Hydrogen-powered aviation, A fact-based study of hydrogen technology, economics, and climate impact by 2050, May 2020

419 Clean Sky 2, Hydrogen-powered aviation, A fact-based study of hydrogen technology, economics, and climate impact by 2050, May 2020

420 Clean Sky 2, Hydrogen-powered aviation, A fact-based study of hydrogen technology, economics, and climate impact by 2050, May 2020

## 13.2 Annexe 2 : Approfondissement sur les technologies SETI, SETO et STAR

### 13.2.1 Contraintes opérationnelles

| Contrainte opérationnelle et externalités                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Applicable pour... |      |      |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|------|------|
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | SETI               | SETO | STAR |
| Il est nécessaire de garder l'APU en marche afin de fournir de l'air pour démarrer le 2e moteur, mais aussi une génératrice en back-up de la génératrice moteur. Cela réduit le bénéfice en consommation, ce qui est pris en compte dans les calculs.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | x                  | x    | x    |
| Il faut conserver pendant le roulage le moteur alimentant le circuit hydraulique en charge des freins et de la roue avant (les pilotes devront donc faire attention à quel moteur démarrer pour avoir les systèmes hydrauliques opérationnels dont ils ont besoin)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | x                  | x    | x    |
| Certains moteurs requièrent un temps mini de refroidissement après l'atterrissage, pour ceux-là l'obligation de SETI ne serait pas opérationnelle.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | x                  |      | x    |
| Le moteur éteint ne peut pas être démarré juste avant le décollage, car il faut compter de l'allumer 5 min avant le décollage (à affiner selon les moteurs).<br><br>± • 1min pour démarrer un LEAP chaud (le SETO ne sera pas appliqué au 1er vol sur moteur froid de toute façon). Démarrage à faire en ligne droite.<br><br>± • 3min de préchauffage moteur<br><br>± • 1min pour faire la checklist avant décollage<br><br>Il faut donc conditionner l'obligation de SETO au temps de roulage qui dépend de la distance entre le point de stationnement et la piste, donc de la taille de l'aéroport. |                    | x    | x    |
| En cas de forte charge (PAX, fret...), un virage serré ou ralenti peut ne pas être possible (problème de différentiel moteur aussi), et problème aussi en cas de zone de roulage glissante. En général il n'est pas commode de bien contrôler une trajectoire précise (sortie parking) alors que la zone est encombrée.                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                    | x    |      |
| Pour sortir du parking, il peut être nécessaire de pousser la manette au-delà du ralenti, et donc il faut prendre des précautions pour éviter un souffle moteur excessif (risque d'endommager les abords), et de souffler des débris (risque FOD).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                    | x    |      |

### 13.2.2 Risques techniques

| Risques et externalités                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Applicable pour... |      |      |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|------|------|
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | SETI               | SETO | STAR |
| Risque de ne pas détecter une fuite (carburant ou hydraulique) car pas d'opérateur en bout de piste. Il conviendra de demander à la tour de contrôle de vérifier cela grâce à la mise en place de caméras en début de piste. Le SETO ne sera donc pas obligatoire au 1er vol du jour, car si une fuite doit survenir, c'est souvent moteur froid.                                                       |                    | x    | x    |
| Impact D&C (Delay and Cancellation) car risque de retour à la porte d'embarquement si le 2e moteur ne démarre pas une fois en bout de piste (mais risque très faible) ou si une panne est détectée après le démarrage sur ce 2e moteur ou sur tous les systèmes associés dont les génératrices électriques et les différents transferts (APU, GEN1, GEN2) qui se font lors du démarrage ou juste après. |                    | x    | x    |

Externalité positive : La poussée ralenti sol étant souvent jugée trop élevée sur les moteurs récents à fort taux de dilution (ou By-Pass Ratio BPR), on a une problématique d'usure des freins prématurée. Surtout après l'atterrissage, où l'avion est plus léger, d'autant plus que l'avion a déjà chauffé les freins lors de l'atterrissage. Le SETI-SETO et STAR permettent d'y remédier.

### 13.2.3 Considération sur STAR

Il existe déjà des technologies, portées par des industriels comme TLD en France (3 sites de production) qui ont développé des systèmes de traction sur des distances courtes pour éloigner l'avion de la porte et l'y amener. Depuis une dizaine d'années le système Taxibot essaye de proposer une solution de traction sur des distances plus longues et pilotable depuis le cockpit de l'avion. Cependant les tests ne sont pas concluants, la technologie étant trop peu fiable à ce jour toute panne pourrait entraîner des retards importants considérant la densité du trafic sur certains aéroports.

La société Kalmar Motor (Suède) teste des systèmes de traction plus simples, dont la capacité permet de tracter les plus gros avions sur des distances allant jusqu'à 7km (Aéroport d'Amsterdam). Un enjeu est la capacité du train d'atterrissage et de sa fixation à l'avion à résister à des contraintes en fatigue, ainsi qu'à un choc au moment du freinage dû à l'inertie de l'avion. Une collaboration entre les fabricants des systèmes de traction et les aviateurs peut surmonter cette difficulté, ne nécessitant aucune véritable rupture technologique.

En France métropolitaine où l'électricité est décarbonée, ce système doit être électrique pour que le gain soit conséquent, autrement il faut déduire du calcul les émissions de GES liées à la production d'électricité.

Enfin la véritable nouveauté vient du fait que dans un objectif de fiabilité, le système doit être piloté par un conducteur propre, ce qui ne pose pas de problème quand l'avion est vide mais devient une contrainte une fois l'avion rempli

de passager, car la responsabilité revient traditionnellement à l'équipage. C'est donc un nouveau métier qu'il s'agit de créer : pilote de STAR, c'est-à-dire conducteur d'un système de traction remorquant un avion plein, avec les responsabilités que cela engendre. Toutefois ce métier est objectivement non délocalisable. Les contrôleurs aériens verraient également leur fonction modifiée par l'ajout de la gestion de la circulation des tracteurs au sol, tout comme la modification des règles de circulation au sol pour conserver la sécurité nécessaire.

Le STAR sera plus cher qu'un push classique, cependant les coûts seront répercutés sur les passagers, car le coût du système sera mutualisé dans la redevance d'aéroport. Éventuellement, pour une compagnie étrangère n'envoyant qu'un avion par jour à Paris. On peut envisager une exemption d'utiliser le système, mais comme son coût est mutualisé dans la redevance d'aéroport, elles ne gagnent pas en compétitivité à ne pas utiliser le système.

### 13.3 Annexe 3 : Situation du secteur en 2020, impacts de la crise COVID-19

Les situations associées à certaines entreprises citées dans le chapitre « 5.8 Situation du secteur en 2020, impacts de la crise du COVID-19 » sont explicitées plus en détail ci-dessous, avec les sources associées.

#### 13.3.1 Compagnies aériennes citées

**Norwegian** a été contrainte de se mettre sous la protection de la loi des faillites, après le refus en novembre 2020 par l'état norvégien d'une deuxième demande de soutien<sup>421</sup>. Elle se recentre désormais, avec une flotte réduite, sur le réseau intra européen et scandinave, mais des incertitudes importantes subsistent quant à sa pérennité. Elle aura réduit son effectif de 8 000 personnes sur l'année 2020, et 2 000 nouvelles suppressions de postes sont attendues en 2021 avec de nouvelles fermetures de bases, notamment en France.

**Virgin Atlantic**, dont le trafic transatlantique représentait 70% de l'activité, a réduit son effectif de 50% (4 700 suppressions de postes sur 10 000 salariés), réduit sa flotte de 20% et recentré ses activités sur l'aéroport d'Heathrow en fermant sa base de Gatwick. Un plan de recapitalisation de 1,2 milliards de livres sur 18 mois était estimé suffisant à fin 2020 lui permettre de passer l'année 2021, malgré la baisse attendue du nombre de vols opérés<sup>422</sup>.

421 Le Monde, 20 mai 2020, [L'État chinois entre au capital de Norwegian](#) ; Les Echos, 28 août 2020, [Norwegian ne passera pas l'hiver sans une nouvelle aide financière](#) ; Les Echos, 9 nov. 2020, [La Norvège lâche la compagnie aérienne Norwegian](#) ; Les Echos, 14 jan. 2021, [Norwegian dit adieu à ses vols low cost long-courrier](#)

422 Les Echos, 5 mai 2020, [Coronavirus : Richard Branson rogne les effectifs de Virgin Atlantic](#) ; Virgin Atlantic, 14 juil. 2020, [A Solvent Recapitalisation of Virgin Atlantic](#) ; Les Echos, 15 juil. 2020, [Richard Branson parvient à renflouer Virgin Atlantic sans l'aide de Londres](#) ; Les Echos, 4 sept. 2020, [Virgin Atlantic va finalement supprimer la moitié de ses effectifs](#)

**IAG (maison mère de British Airways)** a enregistré une perte d'environ 5,6 milliards d'euros sur les neuf premiers mois de l'année 2020, et une baisse de chiffre d'affaires de 66% par rapport à la même période sur 2019. Pour réduire son endettement, le groupe IAG a levé 2,7 milliards d'euros en septembre 2020 et licencié des milliers de salariés (British Airways a ainsi supprimé 10 000 emplois sur un effectif de 42 000 avant crise entre mars et octobre)<sup>423</sup>.

**Air Canada, WestJet** : au Canada, les compagnies nationales n'ont pour l'instant bénéficié d'aucune aide d'état. Les négociations sont au point mort depuis novembre, le gouvernement canadien posant comme condition préalable le remboursement des vols annulés en début de crise par les compagnies, mais ces dernières estiment ce remboursement impossible sans aide d'état... Air Canada entre autres est en effet très affaibli (perte nette d'un peu moins de 3,5 milliards de dollars canadiens sur les 9 premiers mois de l'année 2020, suppression de 20 000 postes, montants des billets à rembourser de 2,6 milliards de dollars canadiens) et ses perspectives dépendent de l'obtention de ce soutien<sup>424</sup>.

**Groupe Lufthansa (Lufthansa, Austrian Airlines, Swiss et Brussels Airlines)** : la compagnie Lufthansa continuait de perdre « 1 million d'euros toutes les deux heures » en début d'année 2021, selon son PDG<sup>425</sup>. Sur les neuf premiers mois de l'année 2020, la perte nette de Lufthansa s'élevait en effet à 5,6 milliards d'euros, pour un chiffre d'affaires de 11 milliards (contre 28 milliards sur la même période de 2019). Sa trésorerie restait importante au moment de la publication de ces résultats, essentiellement du fait du plan de sauvetage de 9 milliards d'euros accordé par l'Allemagne, la Suisse, l'Autriche et la Belgique. Cependant, les pertes devraient augmenter au quatrième trimestre, avec la rechute du trafic et les charges exceptionnelles liées aux plans sociaux. La compagnie va en effet progressivement supprimer 29 000 postes, dont 9 000 en Allemagne. Elle a réduit son offre à 25% de sa capacité actuelle, qui se verra elle aussi réduite progressivement. Sa flotte sera ramenée à 610 appareils en 2025, confirmant la stratégie annoncée par le PDG de la compagnie : « Lufthansa sortira de cette crise plus mince et plus petite ».

**Air France-KLM**<sup>426</sup> : les états français et néerlandais se sont

423 Courrier international, 29 avr. 2020, [Transports. Plombée par la chute du trafic aérien, British Airways va licencier 12 000 personnes](#) ; Les Echos, 12 oct. 2020, [British Airways s'offre une crise de gouvernance en pleine crise sanitaire](#) ; IAG Group, 30 oct. 2020, [Ninemonths Results Announcement](#) ;

424 Air Canada, 9 nov. 2020, [Air Canada annonce ses résultats pour le troisième trimestre de 2020](#) ; Les Echos, 30 jan. 2021, [Au Canada, les compagnies aériennes attendent désespérément l'aide de l'État](#)

425 Les Echos, 21 sept. 2020, [Lufthansa contraint de réduire davantage la voilure](#) ; Les Echos, 5 nov. 2020, [Covid : Lufthansa se met en quasi-hibernation](#) ; Les Echos, 7 dec. 2020, [Lufthansa s'accorde avec les syndicats sur la suppression de 29.000 postes](#) ; Les Echos, 21 jan. 2021, [Lufthansa perd encore un million d'euros toutes les deux heures](#)

426 Le Monde, 3 juil. 2020, [Air France annonce 7 580 suppressions de postes](#) ; Les Echos, 13 sept. 2020, « Nous ferons ce qui est nécessaire pour garantir la survie d'Air France » affirme Bruno Le Maire ; Le Monde, 31 juillet 2020, [Air France-KLM : l'État n'écartera pas une recapitalisation](#) ; Les Echos, [Fin du suspense chez KLM avec l'accord des pilotes au gel des salaires](#) ; Le Monde, 17 nov. 2020, [Air France-KLM recherche 6 milliards d'euros supplémentaires pour assurer son avenir](#) ; Les Echos, 22 déc. 2020, [Air France boucle le douloureux plan de restructuration de sa filiale Hop!](#) ; Les Echos, 27 jan. 2021, [Chez Air France, le cargo prend sa revanche](#)

engagés quasiment dès le début de la crise, à prêter respectivement 7 et 3 milliards d'euros aux deux compagnies Air France et KLM. Malgré tout, une nouvelle injection de liquidités sera nécessaire pour que le groupe puisse survivre à la crise en 2021. La crise a accéléré par ailleurs la mise en place de mesures sans cesse repoussées par les directions précédentes : réduction drastique des coûts sur les vols court-courriers structurellement déficitaires, notamment au sein de sa filiale HOP!, opérant des vols régionaux durs à rentabiliser, avec la suppression envisagée de 1000 postes (soit 40% de l'effectif avant crise). Sur l'ensemble du groupe ce sont 7 500 emplois qui seront supprimés, principalement par départs volontaires et non-remplacement. La direction d'Air France-KLM a maintenu un maximum de vols, pour profiter immédiatement d'une éventuelle reprise du trafic. Cependant, depuis l'automne 2020, cette stratégie est mise à mal avec la prolongation de la crise : le chiffre d'affaires a chuté de 70% au troisième trimestre, malgré le maintien de l'activité cargo et des vols dont les coûts d'exploitations pouvaient être couverts. La compagnie a dû depuis rechercher de nouvelles sources de financement et négocier avec l'état français un accord de chômage partiel de longue durée. Une recapitalisation d'Air France par l'état français est même évoquée.

**RyanAir** connaîtra « l'année la plus difficile en 35 ans d'histoire » sur l'exercice fiscal 2020, selon son directeur général avec une perte estimée autour de 900 millions d'euros au 31 mars 2021 et la suppression de 3 000 postes<sup>427</sup>. Sa trésorerie (3,5 milliards d'euros à fin 2020) et le prêt garanti par l'état britannique de 600 millions de livres sterling (678 millions d'euros) lui permettent d'être confiante dans sa capacité de reprise en 2021.

**EasyJet** a enregistré ses premières pertes depuis son lancement en 1996 (1,27 milliards de livres soit 1,41 milliards d'euros) et voit son chiffre d'affaires baisser de 53%. À fin septembre, la compagnie disposait encore d'une trésorerie de 2,3 milliards de livres, après une levée de fonds 2,4 milliards de livres (2,7 milliards d'euros), ce qui, couplé une diminution de son offre à 20% de sa capacité jusqu'à fin mars 2021, lui permet d'absorber la baisse actuelle du trafic. 4 500 postes ont été supprimés sur un effectif de 15 000 personnes<sup>428</sup>.

**Wizz Air**, la compagnie ultra low-cost hongroise et la première sur le marché de l'Europe centrale avant la crise, fait figure d'exception et profite de la conjoncture pour poursuivre son expansion. Après avoir licencié 1 000 personnes sur 4 500 salariés avant crise et réduit les salaires de 14% en moyenne, elle a ouvert neuf bases et 200 nouvelles lignes au deuxième trimestre 2020, diversifié son offre, densifié son réseau, confirmé l'augmentation de sa flotte et ouvert une base à Abu Dhabi en décembre 2020. Elle se positionne ainsi favorablement sur

le moyen terme, sans toutefois que la soutenabilité de sa croissance soit assurée<sup>429</sup>.

### 13.3.2 Industriels cités

**Airbus** a annoncé dès mars 2020 des mesures pour s'adapter à la situation, avec notamment l'augmentation de sa réserve de liquidités disponibles (sous forme de lignes d'emprunt), le recours aux dispositifs d'activité partielle et des plans de réduction des dépenses<sup>430</sup>. La cadence de production des appareils a été réduite de 40% soit 48 appareils à partir d'avril 2020<sup>431</sup>. Enfin, 15 000 suppressions de postes ont été annoncées fin juin 2020, soit 11% des effectifs du constructeur, et s'ajouteront à ces premières mesures d'ici à août 2021<sup>432</sup>. Les 9 premiers mois de 2020 démontrent le très fort impact financier de la crise sur l'avionneur, avec une baisse du chiffre d'affaires de 35% par rapport à la même période sur 2019 et une perte nette d'un peu moins de 2,7 milliards d'euros<sup>433</sup>. Malgré l'importance de la crise, l'avionneur a cependant réussi à livrer 566 avions dont 82 gros porteurs (soit une baisse de 34% par rapport à 2019), enregistré 383 commandes et subi 115 annulations<sup>434</sup>. Son carnet de commande s'établissait à 7 184 avions fin décembre 2020. L'avionneur prévoit une remontée des cadences de production à compter du second semestre 2021<sup>435</sup>, passant de 40 A320 par mois en début d'année à 45 au quatrième trimestre. De plus, en France, après négociations et en faisant appel aux mesures gouvernementales de soutien à l'emploi (APLD, financement CORAC...), les suppressions de postes ont été quasiment réduites de moitié (2 157 au lieu des 4 248 initialement annoncées) et se feront sans départs contraints. Les pertes d'emplois pourraient malgré tout rester élevées dans les autres pays concernés par ce plan social (essentiellement, l'Allemagne, l'Espagne et le Royaume-Uni), l'objectif total de réduction du nombre d'employés n'ayant pas été modifié<sup>436</sup>.

**Boeing**, a vu son chiffre d'affaires reculer de 24% sur l'année 2020, à 58,2 milliards de dollars. Sa perte nette s'établit à 11,9 milliards de dollars<sup>437</sup>. L'avionneur met en œuvre depuis mars 2020 un « plan de transformation » pour s'adapter à la situation<sup>438</sup> : réduction des cadences de production (déjà fortement mises à mal avec l'interdiction d'exploitation du 737

427 Le Parisien, 01 mai 2020, [Coronavirus : le groupe Ryanair prévoit 3 000 suppressions d'emplois](#) ; Les Echos, 1er fév. 2021, [Le Covid commence à peser sur les comptes de Ryanair](#)

428 Les Echos, 28 mai 2020, [Coronavirus : easyJet va supprimer 30 % de ses effectifs](#) ; Challenges, 28 mai 2020, [EasyJet compte supprimer 30% de ses effectifs, soit 4.500 emplois](#) ; Les Echos, 7 sept. 2020, [EasyJet réduit son offre en France au terme d'un été décevant](#) ; Les Echos, 8 oct. 2020, [Perturbations historiques pour easyJet, qui réduit encore la voilure](#) ; Le Journal de l'Aviation, 8 oct. 2020, [EasyJet subit la première perte annuelle de son histoire en raison de la pandémie](#)

429 Les Echos, 9 mars 2017, [Wizz Air veut devenir encore plus low cost que Ryanair](#) ; Les Echos, 24 août 2020, [La low-cost hongroise Wizz Air progresse à la faveur de la crise](#) ; Les Echos, 8 déc. 2020, [Wizz Air, cette compagnie aérienne qui se joue du Covid](#)

430 Airbus, 23 mars 2020, [Airbus announces measures to bolster liquidity and balance sheet in response to COVID-19](#), Le Monde, 29 avril 2020. [Coronavirus : Airbus et l'aéronautique s'enfoncent dans la crise](#) ;

431 Les Echos, 7 sept. 2020, [Airbus a bien ajusté sa production d'avions à la demande](#)

432 Airbus, 29 juin 2020, [Airbus plans to further adapt to COVID-19 environment](#) ; Le Monde, 30 juin 2020, [Airbus va supprimer environ 15 000 postes dans le monde, dont 5 000 en France](#)

433 Airbus, 29 oct. 2020, [Airbus reports Nine-Month \(9m\) 2020 results](#) ;

434 Airbus, 8 jan. 2021, [Airbus 2020 deliveries demonstrate resilience](#) ; Les Echos, 8 jan. 2021, [Les livraisons d'Airbus font de la résistance face au Covid-19](#) ; Le Monde, 14 jan. 2021, [Malgré la violence de la crise, Airbus limite la casse](#)

435 Les Echos, 21 jan. 2021, [Airbus : la production repartira à la hausse dès l'été prochain](#)

436 Les Echos, 23 déc. 2020, [Airbus en passe de boucler son plan social sans départ contraint](#)

437 Boeing, 27 jan. 2021, [Boeing Reports Fourth-Quarter Results](#)

438 Boeing, 28 oct. 2020, [Third-Quarter 2020 Performance Review](#)

MAX), consolidation des chaînes de production du 787 sur un site, optimisation de sa supply chain, amélioration de son excellence opérationnelle... Le portefeuille de produits et les investissements ont également fait l'objet d'une rationalisation en profondeur pour s'adapter aux évolutions du marché et se recentrer sur son cœur de business (voir l'exemple du 747 dans le chapitre 5.8.3 ci-dessus et l'annulation du rachat de la branche aviation commerciale d'Embraer en avril 2020<sup>439</sup>). Boeing a enfin engagé en plusieurs étapes la suppression de près de 30 000 postes sur un effectif de 161 000 à fin 2019<sup>440</sup>. À la fin 2020, Boeing a réalisé 157 livraisons (dont 114 gros porteurs), soit moins que les livraisons 2019, déjà largement inférieures à celles de 2018 (806 livraisons). L'avionneur a de plus subi de nombreuses annulations de commandes, concernant essentiellement le 737 MAX (758 annulations depuis son immobilisation en mars 2019)<sup>441</sup>. Son carnet de commandes restait toutefois de l'ordre de 5 000 appareils et la fin de l'année a montré des signes encourageants, avec la reprise des vols du 737 MAX<sup>442</sup>, la remontée des livraisons et des commandes importantes (Ryanair et Alaska Airlines avec respectivement 75 et 23 appareils).

**La division Aviation de General Electric (États-Unis)** a annoncé, pour les neuf premiers mois 2020, un chiffre d'affaires d'un peu plus de 16 milliards de dollars et un bénéfice de 681 millions de dollars, respectivement en baisse de 32% et de 86% par rapport à la même période 2019. Face à la crise, la division a renforcé en mai 2020 les premières mesures de réduction de coûts prises en mars, ce qui s'est traduit par l'annonce de la suppression de 10 000 postes, s'ajoutant aux 2 800 postes déjà supprimés en mars 2020. Au total, 25% des emplois de la division auront été supprimés<sup>443</sup>.

**Rolls-Royce Holdings PLC**, représentait jusqu'ici environ 0,6% du PIB du Royaume-Uni et 2% des exportations du pays, et s'appuyait sur un réseau de 2 800 sous-traitants. Sur le premier semestre 2020, la division Civil Aerospace affichait une baisse de 37% de son chiffre d'affaires par rapport au premier semestre 2019 (2,5 milliards de livres sterling) et 1,8 milliards de livres sterling de pertes. Principalement spécialisée dans les moteurs d'avions à forte puissance, elle a été particulièrement impactée par la très forte chute du trafic long-courrier et l'anticipation du retrait du service de gros porteurs, du fait de son modèle économique basé sur des contrats de support à l'heure de vol : la division prévoyait ainsi pour 2020 une baisse de 45% des revenus liés aux contrats de support en service à l'heure de vol et 250 livraisons de moteurs. Depuis mai 2020, Rolls-Royce a en-

gagé la sécurisation de ses finances un programme sévère de réorganisation : levée de 5 milliards de livres sterling sous la forme de prêts garantis, d'émissions d'actions et d'obligations, cessions d'actifs jugés non stratégiques estimés à 2 milliards de livres sterling (division nucléaire, filiales ITP Aero et Bergen Engines), ralentissement des cadences, transferts de production entre sites et fermeture de plusieurs implantations au Royaume-Uni et à Singapour. Sur le plan de l'emploi, Rolls-Royce supprime 9 000 postes, dont 8 000 uniquement sur la division Civil Aerospace, sur un effectif de 42 000 salariés avant crise<sup>444</sup>.

**Safran**, motoriste et équipementier français, a publié fin octobre 2020 une prévision de chiffre d'affaires annuel à 16 milliards d'euros, en baisse de 35% par rapport à 2019, mais s'accompagnant d'une marge opérationnelle attendue à 10% et d'un dégagement de cashflow positif sur le deuxième semestre, en ligne avec les objectifs affichés et de la réduction du montant des lignes de crédit souscrites au début de la crise. Sur l'activité de services moteurs civils, Safran annonce en revanche une baisse de chiffre d'affaires de près de 42%<sup>445</sup>. Ces résultats, une exception dans le secteur, s'expliquent par la mise en place dès mars 2020 par Safran d'un plan d'adaptation drastique pour réduire ses coûts : réduction de 40% des achats de matière premières, de 40% des dépenses de sous-traitance, de 74% des investissements, de 33% des dépenses de recherche et développement, annulation du versement du dividende 2019 (soit 1 milliard d'euros). Le groupe a réduit son effectif de 16% (20% en comptant les intérimaires), essentiellement à l'international : près de 17 000 postes ont été supprimés sur ses implantations au Maroc<sup>446</sup>, au Mexique ou aux États-Unis. Safran s'est en revanche engagé à ne procéder à aucun licenciement en France d'ici à fin 2021, grâce à la signature début juillet 2020 avec les syndicats représentatifs d'un accord d'APLD (Accord Partiel de Longue Durée) et d'un plan de transformation d'activité. Ces accords comportant des incitations au départ volontaire ou à la retraite, 3 000 emplois disparaîtront toutefois à terme.

**Latécoère**, spécialisé dans la fourniture d'aérostructures et de systèmes d'interconnexion, a ainsi annoncé une perte de 94 millions d'euros sur le premier semestre 2020. La société a engagé en 2020 la vente d'actifs immobiliers et mis en place un PSE impliquant initialement la suppression de 475 emplois sur 1504 en France et la fermeture de certains de ses sites (Latélec à Blagnac par exemple), dont les conséquences pourraient toutefois être atténuées avec la négociation d'un APC. Début février, la société a annoncé la réduction du nombre de

439 Les Echos, 27 avr. 2020, [Sans Embraer, Boeing renonce à refaire jeu égal avec Airbus](#)

440 Les Echos, 29 avr. 2020, [Boeing va supprimer 10 % de ses effectifs et réduire durablement sa production](#) ; La Tribune, 30 avr. 2020, [Aéronautique : en pleine crise, Boeing supprime 16.000 postes](#) ; Les Echos, 28 oct. 2020, [Boeing annonce 7.000 suppressions de postes supplémentaires](#)

441 Les Echos, 12 jan. 2021, [Boeing se console d'un bilan 2020 désastreux avec le retour du MAX](#) ; Boeing, [Orders & Deliveries](#)

442 Le Monde, 20 jan. 2021, [Le Boeing 737 MAX pourra retrouver le ciel européen à partir de « la semaine prochaine »](#)

443 GE Aviation, 4 mai 2020, [An Update on COVID-19 GE Aviation Business Impact](#) ; Les Échos, 5 mai 2020, [General Electric veut supprimer 10.000 emplois supplémentaires dans l'aviation](#) ; General Electric, 28 oct. 2020, [GE announces third quarter 2020 results - Building momentum amidst still-difficult environment](#)

444 Rolls Royce, 27 août 2020, [Rolls-Royce Holdings PLC -2020 Half Year Result \(Presentation\)](#) ; Les Echos, 27 août 2020, [Le motoriste Rolls-Royce dévoile une perte presque égale à son chiffre d'affaires](#) ; Les Echos, 1er oct. 2020, [Rolls-Royce dévoile son plan de sauvetage à 7 milliards de livres](#) ; Le Monde, 24 nov. 2020, [Rolls-Royce, un joyau britannique en péril](#) ; Rolls-Royce, 11 déc. 2020, [Rolls-Royce Holdings PLC Trading update](#)

445 Safran, 30 oct. 2020, [Safran en ligne avec ses objectifs 2020](#) ; Safran, 30 oct. 2020, [Chiffre d'affaires du T3 2020](#) ; Les Echos, 8 déc. 2020, [Comment Safran résiste au mal de l'air](#) ; Le Monde, 22 déc. 2020, [Pour l'aéronautique, le patron de Safran « espère un retour au niveau d'avant-crise début 2024 »](#)

446 Le Monde, 17 nov. 2020, [Au Maroc, un « trou d'air » nommé corona-virus dans le secteur aéronautique](#)

suppressions de postes à 246 au lieu des 345 prévus dans sa branche aérostructures et l'annulation du PSE sur sa branche Interconnexions (130 postes préservés)<sup>447</sup>.

**Figeac Aero**, société spécialisée dans l'industrialisation et la production de pièces élémentaires et d'aérostructures, prévoit un chiffre d'affaires 2020 en retrait de près de 58 % par rapport à 2019, avec une perte nette de 51 millions d'euros. Deux PSE ont été initiés, à Figeac (initialement 320 postes finalement ramenés à 220) et à Méaulte (20 postes), et 742 postes supprimés à l'étranger<sup>448</sup>. L'entreprise présente toutefois des signes encourageants pour l'année 2021, avec notamment l'obtention d'un soutien de l'état de 3,6 millions d'euros, associé à des projets d'optimisation de la productivité et de systèmes d'information, le gain de plusieurs gros contrats et une volonté affirmée de se diversifier (énergie et services industriels)<sup>449</sup>.

**Mécachrome**, société spécialisée dans la mécanique de précision, indique de son côté vouloir supprimer 300 emplois, fermer l'usine MKAD en Ariège (co-entreprise avec Aubert & Duval, voir ci-dessous) et réorganiser une partie de son activité sur le territoire français, notamment au détriment de la région Centre Val de Loire<sup>449</sup>.

**SKF**, société suédoise spécialisée dans la production de roulements mécaniques, a annoncé la suppression de 123 postes dans ses usines de Lons-le-Saunier et de Valence, et une trentaine dans son usine de Valenciennes où elle produit des pièces du moteur LEAP de Safran<sup>450</sup>.

**Aubert & Duval**, spécialisée depuis plus de cent ans dans les matériaux métallurgiques à hautes performances et cruciale pour la filière aéronautique (70% de son activité) mais aussi pour la défense et l'industrie nucléaire française, affichait au troisième trimestre 2020 un chiffre d'affaires de 81 millions d'euros, en baisse de 31%. La société a de ce fait engagé un APC depuis juillet 2020 puis mis en place l'APLD sur l'ensemble de ses 7 sites français. Des plans de formations et mobilités internes, de départs volontaires et des mesures d'âge vont être négociés au premier trimestre 2021, conduisant à la suppression de 380 des 3 700 postes en France. Eramet envisage depuis fin juin 2020 la cession de sa filiale.

Safran a fait montre de son intérêt pour sa reprise<sup>451</sup>, ce qui permettrait de conserver la société dans le giron national, mais une acquisition par un de ses deux principaux concurrents étrangers reste évoquée.

**Sogecclair Aerospace SAS**, filiale française du groupe d'ingénierie Sogecclair a présenté un PSE concernant 245 personnes sur ses 580 salariés français<sup>452</sup>.

**Assistance Aéronautique Aérospatiale (AAA)** a signé en octobre un PSE supprimant 567 emplois parmi ses 1 587 salariés en France<sup>453</sup>.

**Akka Technologies** a finalement annoncé en décembre la suppression de 900 emplois en France<sup>453</sup> après avoir initialement envisagé de mettre en œuvre un accord d'APLD.

**Expleo** envisage d'utiliser les mesures d'APLD pour réduire le nombre de suppressions de postes prévues dans un PSE supprimant 1 538 des 4 919 emplois en France, dont la moitié des 1 300 postes toulousains<sup>455,455</sup>.

**Altran (Capgemini)** souhaite de son côté constituer une structure juridiquement indépendante, regroupant 2 000 de ses ingénieurs sur Blagnac et négocier dans la foulée un accord de performance collective associé à des baisses de salaire<sup>455,455</sup>.

**Alten Sud-Ouest** a licencié 321 personnes entre la fin avril et la fin juillet 2020, en utilisant la clause de mobilité des salariés<sup>454</sup>.

**Air France-KLM Industries**, l'un des acteurs majeurs du secteur MRO, a enregistré une baisse de près de 35% de son chiffre d'affaires sur les 9 premiers mois de 2020, avec des pertes d'exploitation de 366 millions d'euros<sup>455</sup>.

### 13.3.3 Sociétés aéroportuaires citées

**La société d'exploitation de l'aéroport de Londres Gatwick**, contrôlée par le groupe Vinci, avait perdu 80% de son activité à fin août 2020. De plus, certaines compagnies ont décidé de concentrer leurs vols sur leurs bases, comme British Airways sur Londres Heathrow, ce qui a accentué les pertes d'exploitation de l'aéroport de Gatwick. Sa société exploitante a de ce fait annoncé la suppression de 600 postes soit un quart de ses effectifs<sup>456</sup>.

447 Latécoère, 17 sept. 2020, [Latécoère publie ses résultats du premier semestre 2020](#) ; Les Echos, 25 sept. 2020, [Latécoère prévoit de supprimer un tiers de ses effectifs en France](#) ; Les Echos, 15 oct. 2020, [En difficulté, Latécoère cède du foncier](#) ; Touleco, 3 déc. 2020, [Aéronautique. Les salariés de Latelec et Cauquil en grève](#) ; La Dépêche, 18 déc. 2020, [Latécoère : 114 postes en voie d'être «sauvés» dont 38 à Gimont](#) ; Le Journal de l'Aviation, 5 fév. 2021, [Latécoère supprime moins de postes que prévu en France](#)

448 Les Echos, 13 juil. 2020, [Figeac Aero prépare un plan social «significatif»](#) ; Les Echos, 27 août 2020, [Aéronautique : Figeac Aero supprime 320 postes au siège](#) ; La Dépêche, 17 déc. 2020, [Lot : le groupe Figeac Aero reprend des couleurs après une année noire](#) ; Le Journal de l'Aviation, 17 déc. 2020, [Figeac Aero, «extrêmement touché» par la crise, voit la reprise arriver](#) ; Figeac Aero, 2 fév. 2021, [Figeac Aero prépare l'avenir](#)

449 Les Echos, 29 sept. 2020, [Aéronautique : plus de 300 postes supprimés chez Mecachrome](#) ; France 3 Occitanie, 15 sept. 2020, [Ariège : le sous-traitant aéronautique MKAD pourrait fermer, 45 emplois sont menacés](#)

450 Le Journal de l'Aviation, 15 sept. 2020, [SKF prévoit la suppression d'une centaine de postes sur son site de Lons-le-Saunier](#) ; Les Echos, 20 nov. 2020, [Le suédois SKF supprime 400 postes en France](#) ; Le Monde, 14 déc. 2020, [Dans le Jura, le tissu industriel souffre mais ne rompt pas](#)

451 France 3 Occitanie, 1er juil. 2020, [À l'heure où Airbus annonce un plan social historique, le sous-traitant ariégeois Aubert & Duval pourrait être vendu](#) ; Aubert & Duval, 3 juil. 2020, [Aubert & Duval annonce un premier accord collectif pour adapter son organisation à la crise du marché aéronautique](#) ; Les Echos, 7 déc. 2020, [Aubert & Duval engage un plan de 380 départs volontaires](#) ; Les Echos, 8 sept. 2020, [La vente d'Aubert & Duval alerte le ministère de la Défense](#) ; Les Echos, 2 nov. 2020, [Safran confirme son intérêt pour Aubert & Duval](#)

452 L'Usine Nouvelle, 24 juin 2020, [La société toulousaine Sogecclair Aerospace annonce un projet de PSE](#)

453 Les Echos, 17 nov. 2020, [Chômage partiel longue durée et baisse des salaires, le deal d'Akka pour sauver 1.100 emplois](#) ; Les Echos, 18 déc. 2020, [Akka Technologies prévoit 900 suppressions d'emplois](#)

454 Le Monde, 8 déc. 2020, [Covid-19 : les ingénieurs de l'aéronautique, entre désespoir et colère](#)

455 Air France KLM Group, 30 oct. 2020, [Résultats du 3ème trimestre 2020](#)

456 Les Echos, 26 août 2020, [L'aéroport de Londres-Gatwick va supprimer un quart de ses emplois](#)

**L'aéroport d'Heathrow** a engagé un programme d'économies<sup>457</sup> et a annoncé en décembre 2020 que son terminal 4 resterait fermé jusqu'à fin 2021. Le démarrage des travaux d'extension de l'aéroport, finalement autorisés mi-décembre 2020 par la Cour Suprême du Royaume-Uni, a été repoussé de deux ans. La construction d'une troisième piste, pour un montant prévu de 14 milliards de livres sterling, devait initialement démarrer en 2022 et durer quatre ans.

**ADP** prévoit un manque à gagner de 2,5 milliards d'euros sur l'année 2020, avec une perte nette de 543 millions d'euros sur le premier semestre. En novembre 2020, la baisse de trafic était de près 90%, en raison du deuxième confinement en France. Sur l'année, la chute du trafic a été de près de 70% (71% pour Roissy-Charles de Gaulle, 66% pour Orly)<sup>458</sup>. Dès le début de la crise, l'entreprise a été contrainte de mettre en œuvre des mesures d'adaptation.

Sur le plan financier, ADP a ainsi réalisé un emprunt à hauteur de 2,5 milliards d'euros et les investissements du groupe ont été divisés par deux, avec un report des grands projets d'extension de capacité. Seuls les chantiers déjà très engagés<sup>164</sup> seront menés à terme (terminal Orly 4, extension de la zone commerciale du terminal 1 de Roissy Charles De Gaulle et, sur le même aéroport, les travaux de réhabilitation et de jonction du terminal 2B avec le terminal 2D). Le projet de construction du terminal 4 de Roissy Charles De Gaulle a par contre été annulé, à l'initiative du gouvernement français, à la fois en raison des perspectives dégradées du trafic aérien sur les prochaines années, mais aussi en lien avec une volonté d'investissement dans une transformation plus conforme aux objectifs écologiques fixés par le gouvernement<sup>459</sup>. Enfin, concernant l'emploi, un accord sur un plan 1150 départs volontaires (dont 700 non remplacés) sur les 6 250 salariés que compte ADP a été signé début décembre 2020, s'accompagnant de la promesse de ne pas procéder à des départs contraints jusqu'au 1<sup>er</sup> janvier 2022<sup>460</sup>. Ce plan pourrait être associé à la mise en œuvre dès le début de 2021 de mesures d'économies supplémentaires, d'un accord d'activité partielle de longue durée et de réductions de salaires.

### 13.3.4 Tableau récapitulatif des deux scénarios « MAVERICK » ET « ICEMAN »

|                                                                                                         | « MAVERICK »                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | « ICEMAN »                                                         |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| <b>Gains en efficacité énergétique et sur les opérations au sol et en vol</b>                           | Le gain en efficacité énergétique est une hypothèse raisonnable                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                    |
| <b>Roadmap industrielle d'arrivée sur le marché de nouveaux avions</b>                                  | Roadmap agressive, détaillée par type d'avion, incluant : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Gains technologiques optimistes</li> <li>• Entrée en service de courts et/moyens courriers à hydrogène en 2035</li> <li>• Entrée en service d'un long-courrier pouvant voler avec 100% de carburants alternatifs en 2035</li> </ul> | Décalage de 5 ans par rapport à Maverick.                          |
| <b>Cadence de renouvellement des flottes</b>                                                            | Tous les 15 ans                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Tous les 25 ans                                                    |
| <b>Priorité des carburants alternatifs pour l'aérien (production abondante pour les deux scénarios)</b> | 100% de la production de carburants alternatifs dédiée à l'aviation                                                                                                                                                                                                                                                                    | 50% de la production de carburants alternatifs dédiée à l'aviation |

457 Le Monde, 16 déc. 2020, [Aéroport d'Heathrow : feu vert de la Cour suprême britannique au projet d'extension](#)

458 Le Journal de l'Aviation, 17 déc. 2020, [Les Aéroports de Paris accusent une baisse de trafic de près de 90% en novembre](#) ; Le Monde, 18 jan. 2021, [Covid-19 : les aéroports parisiens très sévèrement touchés par la pandémie en 2020](#)

459 Les Echos, 2 sept. 2020, [Roissy : le début des travaux du terminal 4 repoussés d'un an ou deux](#) ; Le Monde, 9 juil. 2020, [Pour l'autorité environnementale, le projet de nouveau terminal à Roissy est à revoir de fond en comble](#) ; Les Echos, 28 juil. 2020, [Le gouvernement appelle à une révision du projet d'extension de Roissy](#) ; Le Monde, 4 fév. 2021, [Jugé « obsolète », le projet de nouveau terminal à l'aéroport de Roissy abandonné par le gouvernement](#)

460 Le Monde, 26 août 2020, [Restructuration de Groupe ADP : la CGT et la CGC refusent le rythme imposé par la direction](#) ; Le Monde, 9 déc. 2020, [Les syndicats d'ADP signent un accord pour 1 150 départs volontaires](#) ; Les Echos, 9 déc. 2020, [Feu vert aux départs volontaires chez ADP](#)



### Contacts

**Contact presse : Ilana Toledano, The Shift Project**  
[ilana.toledano@theshiftproject.org](mailto:ilana.toledano@theshiftproject.org)

**Olivier Del Bucchia, co-auteur du rapport**  
[olivier@goliveprojet.com](mailto:olivier@goliveprojet.com)

**Gregoire Carpentier, co-auteur du rapport**  
[gregoire.carpentier@gmail.com](mailto:gregoire.carpentier@gmail.com)

### À propos de The Shift Project

*The Shift Project* est un think tank qui œuvre en faveur d'une économie libérée de la contrainte carbone. Association loi 1901 reconnue d'intérêt général et guidée par l'exigence de la rigueur scientifique, notre mission est d'éclairer et influencer le débat sur la transition énergétique en Europe. [www.theshiftproject.org](http://www.theshiftproject.org)

### À propos de SUPAERO DECARBO

SUPAERO-DECARBO est un collectif de plus de 100 actuels et anciens élèves de l'ISAE SUPAERO (l'une des grandes écoles qui forme les futurs ingénieurs et décideurs de l'aéronautique et de l'espace), dont plus de la moitié est en poste dans l'industrie aéronautique ou le transport aérien. Les SUPAERO-DECARBO ont pour objectif de proposer, soutenir, accélérer et contribuer à toute initiative permettant d'augmenter le niveau de conscience et de connaissances sur le changement climatique de chacun et d'imaginer le monde de demain, en lien avec l'école et l'industrie.



Avec la contribution de :

