

Crise(s), climat : préparer l'avenir de l'aviation

PROPOSITIONS DE CONTREPARTIES À L'AIDE PUBLIQUE
AU SECTEUR AÉRONAUTIQUE ET À L'AVIATION

27 MAI 2020

Avant-propos

La pandémie de Covid-19 et la crise économique globale qui en résulte entraînent la mobilisation d'un soutien public (État et collectivités) massif à l'activité économique et en particulier aux secteurs les plus touchés, « *quoi qu'il en coûte* ». Le secteur du transport aérien en fait partie.

Alors que ce choc sanitaire éprouve la vulnérabilité de la société française, et particulièrement le secteur de l'aviation, fleuron de l'industrie française, d'autres menaces se profilent. Les conséquences du changement climatique, des tensions sur l'approvisionnement en énergie ou en ressources essentielles ou encore 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 ci-dessus) représente un défi historique dirigé vers tous les acteurs, publics comme privés. Il importe donc que le soutien public vise, bien au-delà de l'objectif de restauration de l'activité économique, à renforcer la résilience et la robustesse de la société et de son économie face aux bouleversements à venir.

Particulièrement éprouvé par la situation, le secteur du transport aérien doit profondément se transformer pour faire face à de tels enjeux. Cette note vise à établir le cadre dans lequel cette transformation pourrait avoir lieu.

Table des matières

Avant-propos	2
Table des matières	3
Synthèse	4
1 Impact climatique de l'aviation : un double effet kiss-pas-cool	10
1.1 Le trafic aérien est en forte croissance.....	10
1.2 Des émissions de CO ₂ conséquentes et croissantes.....	11
1.3 Mais il n'y a pas que le CO ₂	11
1.4 Un record de consommation à l'heure.....	12
1.5 Un usage élitiste	12
2 Efficacité énergétique du transport aérien : les limites du progrès technique.....	13
2.1 Les progrès techniques passés.....	13
2.2 Progrès techniques envisageables.....	13
2.3 À quoi le progrès technique a-t-il servi ?	18
2.4 Bilan : perspectives réelles de progrès techniques et nécessité de la sobriété	19
3 L'attitude de déni des compagnies aériennes... et de l'État.....	20
3.1 Les compagnies aériennes continuent d'ignorer les enjeux et de pratiquer le greenwashing.....	20
3.2 ... voire de prendre des décisions irresponsables	20
4 Pour agir, que peut faire l'État immédiatement ?.....	22
4.1 L'État, loin de donner la direction d'une transition, répercute les argumentaires de l'industrie	22
4.2 Appliquer les (quelques) mesures techniques décarbonantes à disposition immédiate	23
4.3 Planifier et organiser la réduction de la consommation de carburant	34
4.4 Ouvrir des perspective de relance et de diversification	49
5 Conclusion	55
6 Annexe : Précisions sur les opérations au sol.....	56
Contributeurs et remerciements	58

1. Introduction

La pandémie de Covid-19 et la crise économique globale qui en résulte entraînent la mobilisation d'un soutien public (État et collectivités) massif à l'activité économique et en particulier aux secteurs les plus touchés, « *quoi qu'il en coûte* ». Le secteur du transport aérien en fait partie.

Alors que ce choc sanitaire éprouve la vulnérabilité de la société française, et particulièrement le secteur de l'aviation, fleuron de l'industrie française, d'autres menaces se profilent. Les conséquences du changement climatique, des tensions sur l'approvisionnement en énergie ou en ressources essentielles ou encore l'altération de la biodiversité sont autant de bouleversements qui affecteront davantage encore le système socio-économique français et international.

Les transformations d'ampleur à engager pour y faire face (décarbonation de l'économie ; adaptation aux chocs ci-dessus) représentent un défi historique pour tous les acteurs, publics comme privés. Il importe donc que le soutien public vise, bien au-delà de l'objectif de restauration de l'activité économique, à renforcer la résilience et la robustesse de la société et de son économie face aux bouleversements et changements à venir.

Particulièrement éprouvé par la situation, le secteur du transport aérien doit profondément se transformer pour faire face à de tels enjeux. Cette note vise à établir le cadre dans lequel cette transformation pourrait avoir lieu.

2. État des lieux du transport aérien

CONSTAT N° 1

La contribution du transport aérien au dérèglement climatique est importante (de l'ordre de 6% du forçage radiatif au niveau mondial)¹. Rapportée au passager et au temps de déplacement, la consommation de pétrole engendrée par le transport aérien est très supérieure à n'importe quel autre moyen de transport.

Le trafic aérien augmente fortement année après année, tant en nombre de passagers transportés qu'en distance parcourue. Sur les 5 dernières années, le trafic mondial, en passagers.km, a augmenté en moyenne de 6,8% par an², soit un doublement tous les 10 ans. La France n'échappe pas à cette tendance : le trafic français a cru de 4,1% par an sur la même période, et a été multiplié par presque 5 depuis 1980³.

La combustion d'un litre de kérosène émet plus de 3kg de CO₂⁴. L'aviation civile émet ainsi au niveau mondial 1,1 milliard de tonnes de CO₂ par an⁵, soit 2,6% des 37 gigatonnes de CO₂ d'origine fossile rejetées annuellement⁶. Les émissions CO₂ du transport aérien (aviation commerciale) en France ont été en 2018 de 22,7 millions de tonnes (+3,8% par rapport à 2017) et sont à 80% dues aux vols internationaux⁷.

L'aviation a aussi des impacts hors CO₂ sur le climat, relativement courts mais très intenses, qui viennent multiplier par 2 à 3 l'effet du CO₂ seul⁸. En effet, l'émission à haute altitude d'oxydes d'azote (NO_x), de vapeur d'eau et de particules fines favorise la formation de nuages d'altitude et comporte des effets sur la chimie de l'atmosphère. En prenant en compte ces effets, le trafic aérien engendre ainsi un impact climatique équivalent à l'émission de plus de 2,2 milliards de tonnes de CO_{2eq} (dont plus de 40 MtCO_{2eq} au départ de la France).

Par heure de trajet, la consommation de carburant d'un passager voyageant en avion est très supérieure à tout autre mode de transport. Un avion moderne aménagé en classe économique et correctement rempli consomme près de 3 litres par passager aux 100km. Ce chiffre est à peu près équivalent à celui des trajets longue distance en voiture en France⁹. Mais cette comparaison ne rend pas bien compte de la réalité : un passager en classe économique consomme ainsi environ 25 litres par heure de vol contre 4 litres par personne et par heure dans une voiture¹⁰. En raison de l'espace occupé plus important, la consommation par passager de classe dite « affaires » est au moins 3 fois plus élevée qu'en classe économique¹¹. C'est-à-dire que le passager de classe affaire consomme 50 à 100 litres par heure *de plus* que son semblable de classe économique, ceci simplement pour le confort supplémentaire¹².

CONSTAT N°2

Étant donné la difficulté à dégager des voies de progrès technique supplémentaires, la réduction progressive du trafic est le principal levier de réduction des émissions de CO₂ et des effets climatiques hors-CO₂ du transport aérien.

De nombreux progrès techniques réduisant la consommation des avions ont été réalisés par l'industrie¹³. Toutefois, ces progrès techniques ont aussi beaucoup contribué à l'abaissement du coût du transport aérien, et au développement du trafic.

L'amélioration de l'efficacité énergétique a été un objectif important pour les aviateurs et les motoristes dans la mesure où la performance d'un avion neuf, en termes de consommation, est un déterminant essentiel de sa valeur. Toutefois, si de réels progrès ont été accomplis, les ingénieurs s'accordent pour constater que les avions actuels y compris leurs moteurs, atteignent une limite technico-industrielle, qui ne sera vraisemblablement pas dépassée.

De plus, les progrès d'efficacité énergétique passés ont surtout permis le développement du trafic, par un effet rebond qu'aucune politique ne s'attache à maîtriser, et qui vient s'ajouter aux effets de la libéralisation et de la défiscalisation du secteur.

Par ailleurs, l'apparition de ruptures technologiques qui pourraient renverser cette dynamique, accessibles à une échelle industrielle, est un processus lent. Certains facteurs ne favorisent ainsi pas le développement de nouveaux programmes industriels de moteurs ou d'avions radicalement innovants. L'impératif de sécurité, tout d'abord, reste prioritaire et impose des temps de certifications élevés. Surtout, ces programmes représentent des investissements de plusieurs milliards d'euros et comportent une prise de risque industriel élevée.

S'il n'est pas nul, le potentiel des agro-carburants est à tout le moins limité et quoi qu'il arrive largement insuffisant pour

que leur usage réduise significativement l'empreinte climatique de l'aviation. Cette limitation réside principalement dans l'incertitude forte qui existe concernant leur disponibilité en quantité suffisante pour se substituer au pétrole fossile dans des ordres de grandeur pertinents. Par ailleurs, l'industrie du transport aérien met en avant des scénarios et mécanismes dans lesquels les agro-carburants alimenteraient prioritairement l'aviation. Mais rien ne justifie cet ordre de priorité.

Le salut ne semble pas non plus se trouver du côté de la compensation. Au-delà des sujets liés au calcul de l'empreinte climatique d'un vol à compenser, ce mécanisme demeure aujourd'hui fragile : quasiment exclusivement centré sur la plantation d'arbres qui mettront des années à absorber le CO₂ émis en quelques heures par un trajet en avion alors que rien ne garantit leur pérennité, il laisse croire au passager que son impact est neutre, ce qui est faux.

3. Pour agir, que peut faire l'État immédiatement ?

Face à cette situation, **toute politique de réduction des émissions de CO₂ liées au trafic aérien qui n'inclurait pas des mesures de sobriété (et notamment maîtrise de l'effet rebond) devra être considérée comme insincère.** En partant d'un objectif de réduction des émissions de CO₂ de 5%/an (soit au minimum une réduction de 4,2 MtCO₂ entre 2020 et 2025), les propositions suivantes font partie des mesures incontournables que les pouvoirs publics doivent mettre en œuvre immédiatement, avec effet dans les 5 prochaines années, pour être fidèles aux engagements du pays en matière de climat.

Car **c'est bien aux États qu'il revient de planifier dès maintenant l'avenir du transport aérien.** Ce n'est que dans un cadre cohérent, clair et stable que la transformation pourra s'opérer le plus sereinement possible pour les entreprises, les salariés et les usagers. Cette planification devra mobiliser les leviers techniques et organisationnels disponibles, et organiser dès maintenant la réduction du trafic aérien à long terme.

Les propositions formulées forment un ensemble cohérent. Leur mise en œuvre indépendamment les unes des autres n'a donc que peu de sens.

1 Appliquer les (quelques) mesures techniques décarbonantes à disposition immédiatement

Technique 1

CONTREPARTIE : Accélérer la décarbonation des opérations au sol, notamment en assurant la majorité des roulages par des tracteurs électriques.

LE RATIONNEL : L'usage des réacteurs pour les roulages étant très inefficace, il convient de leur substituer des systèmes plus optimisés.

**GAIN CO₂
D'ICI 2025**
**0,7
MtCO₂**

Technique 2

CONTREPARTIE : Remplacer les turboréacteurs de petite capacité par des appareils à hélices.

LE RATIONNEL : Les turbopropulseurs consomment nettement moins (30 à 40%) que les jets mobilisés sur les lignes régionales, et ont peu d'impact climat hors CO₂ car ils volent moins haut. De surcroît cette mesure est favorable à l'industrie franco-européenne.

**GAIN CO₂
D'ICI 2025**
**0,1
MtCO₂**

Technique 3

CONTREPARTIE : Limiter fortement le *Fuel Tankering*.

LE RATIONNEL : En cas de différence de prix du carburant entre aéroports, les avions emportent en général un excès de carburant depuis l'aéroport où le carburant est le moins cher. La masse supplémentaire ainsi embarquée conduit à une surconsommation.

**GAIN CO₂
D'ICI 2025**

0,1
MtCO₂

Technique 4

CONTREPARTIE : Optimiser les trajectoires de vol avec un *Cost Index* égal à 0.

LE RATIONNEL : Le *Cost Index* est un paramètre utilisé par les compagnies aériennes pour définir la trajectoire de vol pour laquelle les coûts d'exploitation sont optimisés (coûts de carburant, de personnels, de maintenance, etc.). Lorsque cette valeur est égale à 0, la trajectoire de vol est la plus économe en énergie.

**GAIN CO₂
D'ICI 2025**

0,2
MtCO₂

2

En parallèle des mesures techniques, **planifier et organiser par voie réglementaire la réduction de la consommation de carburant du trafic aérien au départ ou à destination du territoire français**

Sobriété 1

CONTREPARTIE : Supprimer d'ici fin 2022 des liaisons aériennes domestiques là où l'alternative ferroviaire est satisfaisante (voyage <4h30 à une fréquence suffisante), quelle que soit la compagnie aérienne. Le plafond réglementaire du trafic sur l'aéroport d'Orly est diminué du nombre de vols correspondant. Exemption pour les seuls passagers en correspondance.

LE RATIONNEL : Pour un grand nombre de liaisons aériennes, une alternative ferroviaire existe. En France, pour le même trajet, un voyage en train émet en moyenne près de 40 fois moins de CO₂ qu'un voyage en avion.

**GAIN CO₂
D'ICI 2025**

0,9
MtCO₂

Sobriété 2

CONTREPARTIE : Interdire les vols « aviation d'affaires » pour motifs privés.

LE RATIONNEL : Les émissions par passager sont au moins 20 fois plus importantes que celles d'une classe économique. Par ailleurs, 96% des vols en jet sont réalisés à des fins privées.

**GAIN CO₂
D'ICI 2025**

0,4
MtCO₂

Sobriété 3

CONTREPARTIE : Restreindre les avantages liés aux programmes de fidélité (notamment le système de « miles »).

LE RATIONNEL : L'ensemble de ces dispositifs vise à limiter le trafic aérien « d'opportunité » (i.e. qui n'aurait pas été réalisé sans miles). On peut considérer que 5% du trafic des grandes compagnies aériennes est lié à l'usage de miles et que 50% de ce trafic est opportuniste.

**GAIN CO₂
D'ICI 2025**

0,4
MtCO₂

Sobriété 4

CONTREPARTIE : Imposer la décroissance de la consommation moyenne annuelle de carburant, pour tous les vols touchant le territoire français. Le mécanisme réglementaire correspondant, se resserrant d'année en année, devra être conçu en concertation avec les acteurs du secteur.

LE RATIONNEL : Plusieurs leviers d'efficacité ou de sobriété sont mobilisables :

- renouvellement accéléré des flottes en faveur d'avions plus récents ;
- densification des cabines : diminution du ratio de classes luxueuses, voire recours à des classes économiques densifiées ;
- augmentation des taux de remplissage.

Etant donné le caractère très concurrentiel de l'industrie, il semble préférable de ne pas fixer d'objectif par levier. C'est donc une mesure générale et technologiquement neutre qui est proposée, pour laisser chaque compagnie s'adapter au mieux.

**GAIN CO₂
D'ICI 2025**

**2,7
MtCO₂**

Sobriété 5

CONTREPARTIE : Informer et sensibiliser le consommateur à hauteur des enjeux :

- réglementation renforcée de la publicité pour le transport aérien ;
- réglementation renforcée des offres commerciales, notamment via les agences de voyages (affichage systématique de l'empreinte climatique du voyage hors compensation).

LE RATIONNEL : La sensibilisation des consommateurs est un véritable enjeu et un véritable levier pour transformer les habitudes et les comportements vers des modes plus vertueux pour le Climat.

Mieux communiquer sur l'impact climat du transport aérien et ses alternatives aura un impact à la baisse sur la demande de transport aérien.

**GAIN CO₂
D'ICI 2025**

**Difficilement
chiffable**

3

Diversifier les activités des compagnies aériennes et relancer l'industrie aéronautique française.

i. Transposer dans la grande vitesse ferroviaire les compétences, et une partie des emplois, d'Air France.

Les compagnies aériennes et les services aéroportuaires représentent près de 100 000 emplois en France¹⁴. Leur volume est en première approximation proportionnel au trafic aérien, lui-même presque proportionnel à la consommation de carburant. La reconversion d'une part de ces emplois est donc incontournable, et une politique d'emploi ambitieuse doit s'efforcer de diriger la production et la consommation vers des produits et services moins intenses en énergie, en carbone et

en importations, et donc plus intenses en emplois, que le transport aérien. On propose ici une mesure de diversification « intra-secteur » d'Air France, s'appuyant sur sa culture et son savoir-faire en matière de voyage, de service au passager et de performance industrielle.

NB : Le « plan de transformation de l'économie française » du Shift Project, publié dans sa version finale en septembre 2020, présentera quant à lui le panorama des reconversions « inter-secteurs » possibles.

Perspective 1

CONTREPARTIE : Transposer dans la grande vitesse ferroviaire les compétences, et une partie des emplois, d'Air France.

LE RATIONNEL : L'offre grande vitesse actuellement disponible tend d'année en année à se concentrer sur les relations les plus massives, opérés par des trains hyper-capacitaires (TGV Duplex, préférence pour les rames doubles, développement de Ouigo, etc.). Sur les relations transversales, les TGV sont peu fréquents, et souvent significativement moins rapides que ce que le réseau permettrait.

La présente contrepartie propose qu'Air France investisse dans un parc de **rames à grande vitesse de petite capacité**, et développe des **liaisons « fines »** (rassemblant un nombre modéré de passagers), principalement inter-secteurs mais aussi radiales. Ces liaisons contribueront entre autres à alimenter son *hub* de Roissy, avec les fréquences et le niveau de service qui convient.

Pour rendre ce modèle économique viable, cette mesure doit être accompagnée d'une refonte des péages d'infrastructures, qui correspondent actuellement au modèle de rames très capacitaires.

ii. La réflexion lucide sur la sobriété est aussi porteuse d'une stratégie plus sûre pour l'industrie aéronautique française

La filière aéronautique comporte de 200 000 à 350 000 emplois¹⁵ (avionneurs, motoristes, sous-traitants, activités de recherche et d'enseignement associées). Il s'agit d'une industrie stratégique, fortement contributrice aux exportations françaises, avec environ 35 milliards d'euros d'exportations nettes chaque année¹⁶. La France détient en effet une part de marché de 8% de l'industrie¹⁷, et de 16% des exportations aéronautiques mondiales¹⁸.

L'enjeu pour cette industrie est de passer d'un mode d'activité reposant principalement sur la croissance du trafic, à un mode reposant essentiellement sur l'optimisation de la performance

énergétique des appareils, pour consommer le moins possible, dans le cadre d'un trafic mondial stabilisé voire en baisse.

Pour basculer, il faudra que les compagnies aériennes aient une incitation forte à remplacer leurs avions précédents, et que l'industrie soit convaincue que développer les programmes correspondants ne représente pas un risque industriel excessif. Ces conditions ne sont pas réunies aujourd'hui.

Ceci doit inciter, d'une part, à porter des politiques volontaristes incitant fortement à l'efficacité énergétique, pour enclencher dès maintenant ce processus au niveau mondial ; et d'autre part à développer dès maintenant, avec la garantie de l'État, un programme d'avion poussant aussi loin que possible l'efficacité énergétique.

Perspective 2

CONTREPARTIE : Lancer, soutenir et accompagner un programme de développement aéronautique visant à initier la production d'ici 2030 d'un avion adapté aux nouveaux besoins de mobilité aérienne, aux nouvelles exigences en matière de consommation d'énergie, et aux nouvelles conditions de vol dans un contexte de changement climatique.

LE RATIONNEL : Redonner du sens à la filière industrielle aéronautique civile et redynamiser l'innovation qui y a toujours prévalu ; renouer avec la tendance à l'amélioration énergétique des avions, aujourd'hui essoufflée, en soulageant les industriels des risques qui interdisent les programmes longs et intégrés d'avions de rupture, et en anticipant dès maintenant sur une valorisation future plus forte des économies d'énergie ; préparer ainsi un avenir plus économe en carburant pour le transport aérien.

Le gain d'efficacité énergétique de l'ordre de 25% par rapport au meilleur standard du marché en 2020 est à atteindre.

4. Conclusion

Le transport aérien fait partie des quelques secteurs pour lesquels il n'existe pas, ni à court ni moyen terme, d'alternative technologique « décarbonée » (à la différence du transport automobile par exemple). Cette caractéristique fait de ce secteur une victime de l'inéluctable transition vers une économie bas-carbone. De nombreux emplois, de nombreux territoires et entreprises seront affectés tôt ou tard.

Repousser l'échéance ne ferait qu'aggraver le choc.

Cette situation démontre indéniablement le besoin d'une stratégie nationale claire et ambitieuse pour transformer profondément ces activités avant qu'elles ne subissent durement les effets des contraintes physiques.

Cette étude en dessine les voies possibles et sincères. Même conçue avec la plus grande attention aux emplois, cette transformation n'en maintiendra pas le nombre au sein du secteur du transport aérien.

Ceci confirme la nécessité d'une stratégie prévoyant des mouvements de salariés entre secteurs, et le développement résolu des secteurs fortement décarbonables.

Une telle stratégie est justement l'objet du « plan de transformation de l'économie française » du *Shift Project*, publié dans sa version finale en septembre 2020.

NOTES

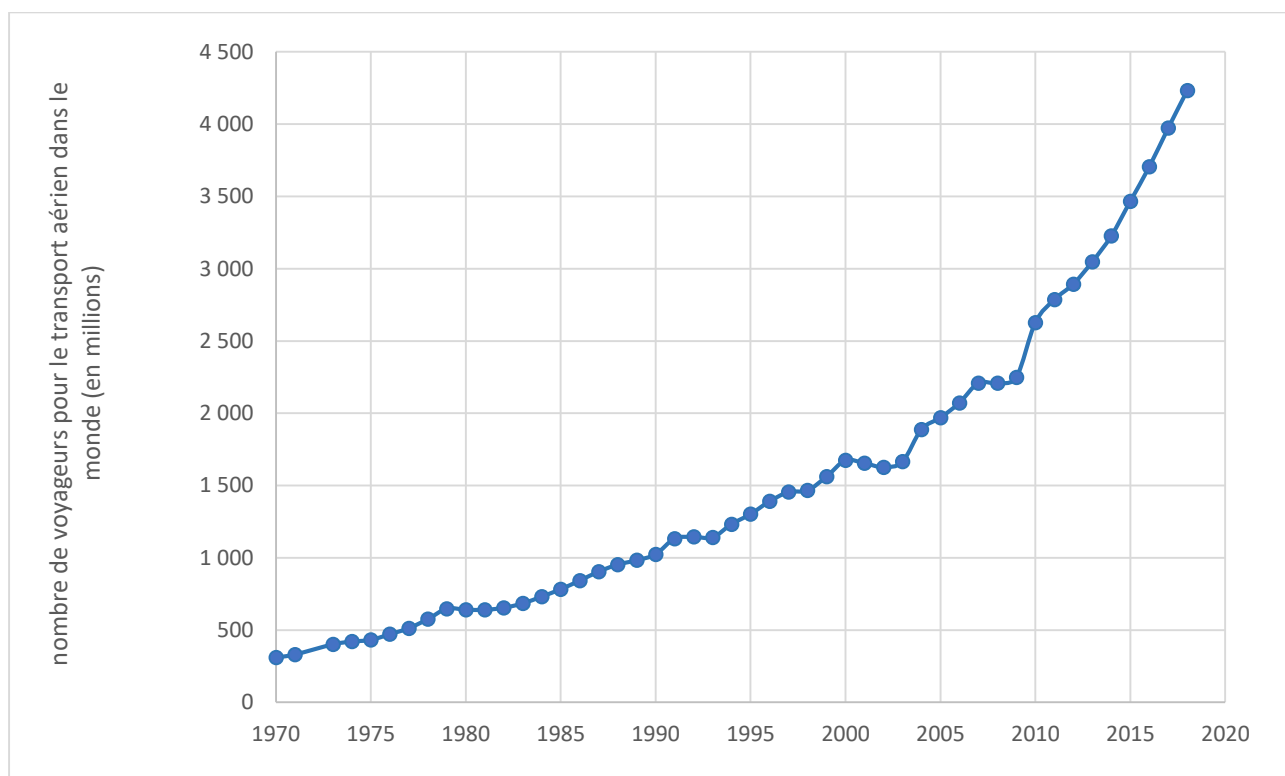
1. Voir « [Aviation and global climate change in the 21st century](#) », (Lee, 2010). Plus précisément, la part du trafic aérien en incluant l'ensemble de ses effets sur le climat représentait, en 2005, 4,9% du total mondial : « *These new results indicate that aviation represents a 3.5% share of total anthropogenic forcing in 2005 (90% likelihood range of 1.3–10%), excluding AIC (Aviation Induced Cloudiness), or a 4.9% share (90% likelihood range of 2–14%) including AIC* ». Le trafic passager mondial a cru de 115% entre 2005 et 2018 (données Banque mondiale).
2. IATA, Industry statistics – Fact sheet, Juin 2019. Augmentations de 2013 à 2018.
3. Voir [INSEE](#). Il s'agit ici de la somme de tous les passagers arrivant ou partant de France.
4. 2,52 kg de CO₂ directement émis, à quoi il faut ajouter 0,52 kg pour l'extraction, le transport et le raffinage, soit un facteur d'émission total de 3,04 kg de CO₂ par litre de kérosène, selon la base carbone de l'ADEME.
5. Valeur obtenue en multipliant la consommation de kérosène (360 million de m³ en 2018 selon [IATA](#)) par la quantité de CO₂ émise par la combustion.
6. Voir [Global Carbon Project](#), Le Quéré (2019).
7. Voir « [Les émissions gazeuses liées au trafic aérien](#) », DGAC (2020).
8. Voir « [Can we accelerate the improvement of energy efficiency in aircraft systems?](#) », Lee (2010) dans *Energy conversion and management* et « [Formation and radiative forcing of contrail cirrus](#) », Karcher (2018) dans *Nature Communications*. Cette fourchette reflète l'incertitude encore importante qui affecte l'évaluation précise de l'impact.
9. Pour un taux de remplissage moyen de l'ordre de 2 personnes par véhicule.
10. Ordre de grandeur valable pour les longs trajets autoroutiers (environ 9 litres par heure à diviser par deux personnes en moyenne) ou sur les trajets courts comme les déplacements domicile-travail (effectués au moins deux fois plus lentement parce qu'en ville ou sur des réseaux congestionnés, mais avec une voiture en moyenne deux fois moins remplie).
11. Estimation basse qui provient de la mesure de l'empreinte au sol d'un siège classe Affaires versus un siège classe Eco à partir des plans cabine disponibles sur le [site d'Air France](#).
12. Sur un aller-retour France-Chine ou France-Californie de 20 heures, on parle d'une surconsommation de 1000 à 2000 litres par personne, soit au moins autant que la consommation moyenne d'une voiture sur une année (environ 40 millions de véhicules qui consomment en France environ 40 milliards de litres par an, d'après l'INSEE).
13. 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. Voir « [Can we accelerate the improvement of energy efficiency in aircraft systems?](#) », Lee (2010) dans *Energy conversion and management*.
14. Fédération Nationale de l'Aviation Marchande (FNAM) : <https://www.fnam.fr/qui-sommes-nous->
15. Le Groupement français des industries aéronautiques et spatiales (GIFAS) indique ainsi représenter de 195 000 à 350 000 emplois en France, en tenant compte de toute la filière. Voir <https://www.aireemploi.org/medias/secteurs/situationemploi2018.pdf>
16. GIFAS : Rapport Annuel 20019 : https://res.cloudinary.com/gifas/image/upload/rapport/rapport-annuel_2018_2019.pdf
17. Aerodynamic Advisory : The Global Aerospace Industry - Size & Country Rankings - 16 July 2018 : https://aerodynamicadvisory.com/wp-content/uploads/2018/07/AeroDynamic-Teal_Global-Aerospace-Industry_16July2018.pdf
18. World's Top Exports - Aerospace Exports by Country : <http://www.worldstopexports.com/aerospace-exports-by-country/>

1 Impact climatique de l'aviation : un double effet kiss-pas-cool

Constat n° 1 : La contribution du transport aérien au dérèglement climatique est importante (de l'ordre de 6% du forçage radiatif au niveau mondial)¹. Rapportée au passager et au temps de déplacement, la consommation de pétrole engendrée par le transport aérien est très supérieure à n'importe quel autre moyen de transport.

1.1 Le trafic aérien est en forte croissance

Le trafic aérien augmente fortement année après année, tant en nombre de passagers transportés qu'en distance parcourue. Sur les 5 dernières années, le trafic mondial, en passagers.km, a augmenté en moyenne de 6,8% par an², soit un doublement tous les 10 ans. La France n'échappe pas à cette tendance : le trafic français a cru de 4,1% par an sur la même période, et a été multiplié par presque 5 depuis 1980³.



Evolution du nombre de voyageurs du transport aérien dans le monde entre 1970 et 2018 (source : Banque Mondiale)

En conséquence, la consommation de carburant de l'aviation civile est en très forte augmentation depuis plusieurs décennies. Cette augmentation ne faiblit pas : sur les 5 dernières années, elle a été en moyenne de **5% par an**, ce qui équivaut à un **doublment tous les 14 ans**. L'association des compagnies aériennes prévoit pour 2019 une consommation mondiale de **6,3 millions de barils de kérosène par jour**⁴, soit **7,7% de la production pétrolière mondiale**⁵.

¹ Voir « [Aviation and global climate change in the 21st century](#) », (Lee, 2010). Plus précisément, la part du trafic aérien en incluant l'ensemble de ses effets sur le climat représentait, en 2005, 4,9% du total mondial : « *These new results indicate that aviation represents a 3.5% share of total anthropogenic forcing in 2005 (90% likelihood range of 1.3–10%), excluding AIC (Aviation Induced Cloudiness), or a 4.9% share (90% likelihood range of 2–14%) including AIC* ». Le trafic passager mondial a cru de 115% entre 2005 et 2018 (données Banque mondiale).

² IATA, Industry statistics – Fact sheet, Juin 2019. Augmentations de 2013 à 2018

³ Voir [INSEE](#). Il s'agit ici de la somme de tous les passagers arrivant ou partant de France.

⁴ Prévision de l'industrie (IATA) pour 2019.

⁵ En retenant un total de 82 Mbbl/jour. Un calcul en valeur ou en contenu énergétique donnerait même un chiffre plus élevé.

1.2 Des émissions de CO₂ conséquentes et croissantes

La combustion d'un litre de kérosène émet près de 3kg de CO₂⁶. L'aviation civile émet ainsi au niveau mondial 1,1 milliard de tonnes CO₂ par an⁷, soit 2,6% des 37 gigatonnes de CO₂ d'origine fossile rejetées annuellement⁸. Les émissions CO₂ du transport aérien (aviation commerciale) en France ont été en 2018 de 22,7 millions de tonnes (+3,8% par rapport à 2017) et sont à 80% dues aux vols internationaux⁹.

En raison de l'augmentation du trafic aérien, l'OACI¹⁰ estime que **les émissions de l'aviation**, en considérant une consommation par passager réduite de 33% grâce au progrès technique, **devraient augmenter d'un facteur 4 d'ici 2050**. Retenons que l'organisation avait envisagé une amélioration énergétique de 1,5%/an de 2009 à 2020. Cet objectif n'a pas été atteint, ne serait-ce qu'une seule année¹¹. Au rythme actuel, l'objectif d'efficacité énergétique fixé pour 2020 par l'OACI devrait être atteint au mieux en 2032¹².

On peut donc craindre que les prévisions de cette agence pour 2050 soient optimistes. À ce rythme, et si par ailleurs le total de nos émissions suit une trajectoire compatible avec un réchauffement limité à +2°C, l'aviation représentera non plus 3% mais 15% des émissions de CO₂¹³. L'importance grandissante de l'impact de l'aviation s'exprime aussi au regard du « budget carbone », c'est-à-dire les émissions totales encore « permises » pour respecter une cible de 1,5° à 2°C³ : les rejets de CO₂ de l'aviation civile représenteraient alors près de 27% de ce « budget carbone ».

1.3 Mais il n'y a pas que le CO₂

L'aviation a aussi des **effets hors CO₂** sur le climat, Ces effets sont inexistants, ou très faibles, pour les autres modes de transport. En effet, l'émission à haute altitude d'oxydes d'azote, de vapeur d'eau et de particules fines :

- favorise la **formation de nuages d'altitude**, immédiatement après le passage de l'aéronef, ou de manière légèrement différée. Cet effet est le plus fort. Il produit sur le climat un impact réchauffant ;
- a des **effets sur la chimie de l'atmosphère** : elle favorise la consommation du méthane¹⁴, mais aussi, et malheureusement dans des proportions plus fortes en termes d'impact climatique, la formation d'ozone troposphérique¹⁵.

Ce sont des **effets à faible durée de vie mais très intenses**. Par exemple, l'impact sur la formation des nuages d'altitude a un temps caractéristique de l'ordre de la dizaine de jours, et s'exerce de manière régionale, et non mondiale.

Ces impacts peuvent être comparés à celui du CO₂ grâce à la métrique du « pouvoir de réchauffement global à 100 ans », utilisée par le GIEC pour comparer différentes émissions de gaz à effet de serre. **Les impacts**

⁶ 2,52 kg de CO₂ directement émis, à quoi il faut ajouter 0,52 kg pour l'extraction, le transport et le raffinage, soit un facteur d'émission total de 3,04 kg de CO₂ par litre de kérosène, selon la base carbone de l'ADEME.

⁷ Valeur obtenue en multipliant la consommation de kérosène (360 million de m³ en 2018 selon [IATA](#)) par la quantité de CO₂ émise par la combustion.

⁸ Voir [Global Carbon Project](#), Le Quéré (2019).

⁹ Voir « [Les émissions gazeuses liées au trafic aérien](#) », DGAC (2020).

¹⁰ Organisation de l'aviation civile internationale.

¹¹ Higham et al, 2019. Tourist Aviation Emissions: A Problem of Collective Action. *Journal of Travel Research*

¹² Cames et al, 2015. Emission Reduction Targets for International Aviation and Shipping. Policy Department A: Economic and Scientific Policy. European Parliament.

¹³ Kamb, Larsson, 2019. Climate footprint from Swedish residents' air travel.

¹⁴ Le méthane (qui correspond au « gaz naturel ») est, par ordre d'importance dans les émissions de gaz à effet de serre, le deuxième de ces gaz, après le CO₂. En plus des flux naturellement émis par certains écosystèmes, ses principales émissions proviennent du secteur agricole, et de rejets des secteurs pétrolier et gazier.

¹⁵ L'ozone est un gaz à effet de serre puissant. Il est qualifié « troposphérique » pour le distinguer de sa part présente en plus haute altitude, qui joue un rôle de protection du vivant contre les rayonnements ultra-violet.

hors CO₂ viennent multiplier par 2 à 3 l'effet du CO₂ seul¹⁶. Pour prendre en compte cette influence dans les calculs d'impact, la méthode consistant à **appliquer un facteur 2 à l'effet CO₂ seul¹⁷** fait consensus.

Ainsi un aller-retour en classe économique entre Paris et New York, soit un vol long-courrier relativement court, émet 1 tonne en CO₂ seul, et 2 tonnes-équivalent CO₂ en comptabilisant tous les effets.

Étant donné la complexité des mécanismes physico-chimiques et de leurs interactions, l'évaluation exacte des conséquences reste encore incertaine ; il est possible qu'elles se révèlent plus élevées.

Les effets hors CO₂ étant très intenses à court terme, l'aviation contribue fortement à l'effet de serre : on estime que **dès 2005, l'aviation était à l'origine de 4,9% du « forçage radiatif »¹⁸**, c'est-à-dire de la part de l'effet de serre due à l'activité humaine. Quand il sera réactualisé, ce chiffre se révèlera très vraisemblablement supérieur à 6%, à cause de la croissance du trafic.

Le trafic aérien engendre ainsi un impact climatique équivalent à l'émission de plus de 2,2 milliard de tonnes de CO₂eq (dont plus de 40 MtCO₂eq au départ de la France).

1.4 Un record de consommation à l'heure

La consommation d'un avion moderne aménagé en classe économique et correctement rempli est de l'ordre de **3 litres par passager aux 100km** (sauf avions de petite taille, ou vols très courts). Ce chiffre est à peu près équivalent à celui des trajets longue distance en voiture en France : sur ces trajets, le taux de remplissage moyen est légèrement supérieur à 2 personnes par véhicule.

Mais cette comparaison ne rend pas bien compte de la réalité : personne ne prend sa voiture depuis Paris pour aller participer à une réunion à Toulouse, ni pour aller passer un week-end en Espagne, ni pour partir en vacances sur un autre continent ! Ces usages ne sont rendus possibles, voire répandus, que par la vitesse de l'avion ; ils restent inaccessibles par les autres modes de transport. C'est donc en fait non à la distance, mais au temps de trajet, que la consommation doit être rapportée : la consommation par passager en classe économique est d'**environ 25 litres par heure de vol**. En comparaison, la consommation d'une voiture est, dans le cas défavorable de trajets rapides, d'**environ 4 litres par personne et par heure**, que ce soit sur les longs trajets autoroutiers (environ 9 litres par heure à diviser par deux personnes en moyenne) ou sur les trajets courts comme les domicile-travail (effectués au moins¹⁹ deux fois plus lentement, mais avec une voiture en moyenne deux fois moins remplie).

La consommation par passager de classe dite « affaires » est 3 à 5 fois plus élevée qu'en classe économique. C'est-à-dire que **le passager de classe affaires brûle 50 à 100 litres par heure de plus** que son semblable de classe économique, ceci simplement pour le confort supplémentaire ! Sur un aller-retour France-Chine ou France-Californie de 20 heures, on parle d'une **surconsommation de 1000 à 2000 litres par personne**, soit au moins autant que la consommation moyenne d'une voiture sur une année²⁰.

1.5 Un usage élitiste

Les différents chiffres indiquent que l'avion est un moyen de transport élitiste :

- comme le rappelle même une publication de l'industrie du transport aérien, 40% des Français n'ont jamais pris l'avion, et seuls 30% le prennent une fois par an ou plus. Ceci n'en fait pas un moyen de transport de masse.

¹⁶ Lee, 2010. Can we accelerate the improvement of energy efficiency in aircraft systems? Energy conversion and management. Karcher, 2018. Formation and radiative forcing of contrail cirrus. *Nature Communications*

¹⁷ C'est le cas par exemple dans la base carbone de l'Ademe.

¹⁸ Lee, 2010 "Aviation and global climate change in the 21st century." Tout en haut de la fourchette d'incertitude, ce chiffre atteint 14%.

¹⁹ Pour les trajets du quotidien effectués plus lentement (parce qu'en ville, ou sur des réseaux congestionnés), le chiffre est plus faible que les 4 litres par personne et par heure indiqués ici.

²⁰ Environ [40 millions de véhicules](#) qui consomment en France [environ 40 milliards de litres](#) par an, d'après l'INSEE.

- d'après les statistiques ministérielles, la moitié des déplacements par avion des Français est le fait des 20% dont les revenus par unité de consommation sont les plus élevés.
- en France toujours, 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.

L'explication de ces chiffres réside dans le fait que les déplacements longue distance effectués en pratique sont limités non par le coût du transport aérien, aujourd'hui très bas, mais d'abord 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.**

2 Efficacité énergétique du transport aérien : les limites du progrès technique

Constat n°2 : Etant donné la difficulté à dégager des voies de progrès technique supplémentaire, la réduction progressive du trafic est le principal levier de réduction des émissions de CO₂ et des effets climatiques hors-CO₂ du transport aérien.

2.1 Les progrès techniques passés

Le passage des avions à hélices aux turboréacteurs, enclenché dans les années 50 pour gagner en vitesse, avait occasionné 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 2000²¹. Cette progression vient principalement du renouvellement de la flotte, et dans une moindre mesure, de l'amélioration des taux de remplissage²² et de la densification des cabines.

Les appareils les plus récents peuvent consommer 15 à 20% de moins que ceux de la génération précédente. Ainsi le remplacement, dans les années à venir, de la part de la flotte qui ne l'a pas déjà été permettra de gagner plusieurs pourcents d'efficacité.

Néanmoins, pour que ce gain advienne plus rapidement, il faudrait que le trafic mondial progresse à un rythme plus faible. En effet, les motoristes et avionneurs peinent aujourd'hui à produire au rythme de la forte demande des compagnies. Puisque les investissements dans les usines et dans leurs chaînes d'approvisionnement s'inscrivent dans la durée, le rythme de production des prochaines années est déjà fixé. Pour s'adapter à la plus ou moins forte augmentation du trafic les prochaines années, c'est le rythme de radiation des avions les plus anciens qui constituera la variable d'ajustement. Ainsi **une modération de la croissance du trafic accélérerait la diffusion du progrès technique par renouvellement de la flotte.**

2.2 Progrès techniques envisageables

2.2.1 *Optimisation des trajectoires*

L'optimisation des routes et trajectoires est un levier possible, quoique faible, d'économies de carburant.

²¹ Lee, 2010. Can we accelerate the improvement of energy efficiency in aircraft systems? *Energy conversion and management*.

²² C'est-à-dire la diminution de la proportion de sièges voyageant vides.

L'indicateur « horizontal flight efficiency – KEA », qui mesure l'écart entre la trajectoire réelle d'un vol et sa trajectoire idéale, ne diminue plus significativement²³, et les ambitions (réalistes) affichées par Eurocontrol montrent qu'il sera difficile de faire beaucoup mieux dans les années à venir. 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 grèves récurrentes incitent les compagnies à planifier de nouveaux plans de vols ne traversant pas les secteurs de contrôle impactés ; 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.

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 aériens²⁴ font face à de nombreuses limites. Par exemple, un fournisseur de service de contrôle aérien n'aura pas toujours intérêt à optimiser un flux, si cela implique moins de trafic dans ses espaces, donc moins de redevances pour lui ; un projet trop transformateur pourra être abandonné si le risque de grève prolongée est trop important ; etc. Ainsi, de nombreux projets tendant à une optimisation du réseau aérien à l'échelle européenne prennent beaucoup de retard, voire sont abandonnés.

L'optimisation des routes est donc **possible mais difficile, et pour un gain relativement faible**. 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), syndicat majoritaire pour ces personnels.

Mentionnons enfin que des études exploratoires²⁵ 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. Cette piste, à explorer, mais dont le déploiement ne sera vraisemblablement possible qu'avec une part d'action volontaire des compagnies aériennes, ne réduira, en tout état de cause, qu'une fraction de l'un des différents impacts climatiques des vols.

2.2.2 Mesures opérationnelles

Les opérations au sol, même si elles ne représentent qu'une fraction de la consommation de carburant de l'aviation, ont l'avantage d'être décarbonables. Notamment, les opérations de roulage effectuées sur la poussée des moteurs de l'avion sont particulièrement inefficaces. Des systèmes de moteurs électriques intégrés au train avant, et alimentés par son APU (génératrice électrique embarquée) ont été étudiés, mais présentent l'inconvénient d'alourdir l'avion, donc de le faire consommer davantage en phase de vol. Ils ne seraient donc pertinents que pour les vols les plus courts. Les solutions de décarbonation au sol réellement vertueuses sont donc celles qui prévoient une prise en charge de l'avion par un tracteur de piste apte non seulement à le repousser de son poste de stationnement, comme c'est le cas aujourd'hui, mais aussi à le tracter depuis et vers la piste (voir Contrepartie technique n°1, p17).

²³ <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2019-07/ernip-airac-1905.pdf>

²⁴ Le plus important est le FABEC, un volume centré sur la France et l'Allemagne.

²⁵ Par exemple <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1361920917309987>.

Mentionnons également qu'Airbus étudie le vol en formation²⁶, qui 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 suiveur²⁷.

2.2.3 Moteurs

Les ingénieurs s'accordent pour constater que **les turboréacteurs les plus récents** (LEAP de Safran et GE, soufflante à engrenages de Pratt & Whitney, etc.) **atteignent une asymptote technico-industrielle, qui ne sera vraisemblablement pas dépassée**. Au mieux quelques pourcents pourront être obtenus dans les années à venir²⁸. 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 : plus un moteur a une forte efficacité thermique, plus il produit de traînées de condensation, et plus il est susceptible de rejeter d'oxydes d'azote, responsables de la production d'ozone.

Une voie théoriquement possible serait le **retour à des turbopropulseurs** (moteurs à hélice), qui procureraient un fort gain en consommation de carburant²⁹. Les avions voleraient alors nettement moins vite et nettement plus bas, ce qui supprimerait la grande majorité des effets climatiques hors CO₂. Les avions correspondant ont le mérite de déjà exister, du moins dans une certaine plage de capacité³⁰, et d'être largement français. Malheureusement, la vitesse réduite rend cette solution inenvisageable, dans les conditions économiques actuelles : sauf pour les vols courts, elle induit des coûts³¹ supérieurs aux économies de carburant.

La technologie **Open rotor**, codéveloppée par Safran, qui s'efforce de réunir les avantages du turbopropulseur et du turboréacteur, **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 technologique³². L'Open rotor ayant des incidences sur l'architecture de l'avion, il demandera un avion conçu spécifiquement pour l'accueillir. Enfin il peut 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.

En outre, 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 légère réduction de vitesse³³, de l'ordre de - 10%, et le coût de l'allongement des vols pourrait être considéré comme trop élevé en regard de l'économie de carburant.

²⁶ <https://www.airbus.com/newsroom/press-releases/en/2019/11/airbus-inspired-by-nature-to-boost-aircraft-environmental-performance.html>

²⁷ Le gain est donc deux fois moindre pour les deux avions considérés ensemble. Il va de soi aussi que cette solution n'est exploitable que pour les vols long-courriers, et sur des itinéraires suffisamment parcourus pour réunir plusieurs avions.

²⁸ Notamment sur le long-courrier, si l'industrialisation de, par exemple, 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.

²⁹ Un rapport de 2005 démontrait même qu'en 2005, la performance énergétique des avions à turboréacteurs ne dépassait pas celle des avions à moteurs à pistons et hélices des années 1950 ! : <https://www.transportenvironment.org/publications/fuel-efficiency-commercial-aircraft-overview-historical-and-future-trends>

³⁰ <https://www.latribune.fr/entreprises-finance/industrie/aeronautique-defense/20120218trib000683764/at-ou-l-incroyable-resurrection-d-un-construteur-d-avions-a-helices.html>

³¹ Heures de personnel navigant, nombre de vols pouvant être réalisés par un appareil chaque jour...

³² 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>

³³ 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.

2.2.4 Structure, 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.

2.2.5 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)^{34 35}. 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 0,75³⁶, car la flèche de l'aile (son angulation vers l'arrière) doit être réduite, pour diminuer les effets d'écoulement tridimensionnels déstabilisant l'écoulement³⁷. 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.

2.2.6 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 domaines³⁸, et ne répondant donc pas à la nécessité de maîtriser les émissions de l'aviation dans les quelques décennies à venir.

2.2.7 Voler moins vite ?

Ayant examiné les possibilités de progrès techniques « purs », 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. Pour ce faire, il propulse vers le bas l'air à travers lequel il vole, ce qui dépense de l'énergie³⁹, dépense qui s'avère d'autant plus élevée que l'avion vole lentement⁴⁰. Ainsi, contrairement aux 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

³⁴ Overview of Laminar Flow, NASA-TP/19980232017

³⁵ Review of hybrid laminar flow control systems, K.S.G. Krishnan, O. Bertram, O. Seibel

³⁶ Comme sur le démonstrateur « Blade », dans le cadre de Clean sky.

³⁷ <https://www.aerospacetestinginternational.com/videos/airbus-tests-laminar-flow-wing.html>

³⁸ Jusqu'à l'aménagement des aéroports, pour de tels avions à grande envergure.

³⁹ Cette dépense s'appelle « traînée induite ».

⁴⁰ En effet, en volant plus vite, l'avion trouve plus d'air sur lequel s'appuyer.

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 par l'approche du « mur du son ».

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* », 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 : turbopropulseur, Open rotor**. On en revient ainsi au point exposé plus haut, sur les moteurs.

2.2.8 Voler plus gros ?

De même, 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 fonctionne 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 si forte de la taille des avions⁴¹.

2.2.9 Voler aux agro-carburants ?

Pour l'aviation comme pour les autres secteurs consommateurs de carburants liquides, la question du recours aux agro-carburants peut être posée. Comme pour les autres secteurs, l'intégration d'une large part d'agro-carburants ne poserait pas de problème technique insurmontable.

On rejoint néanmoins ici le débat général sur les agro-carburants, qui sont **très loin d'être disponibles en quantité suffisante pour se substituer au pétrole fossile**. À titre d'exemple, dans leurs Perspectives agricoles 2016-2025⁴², 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. 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 correspond⁴³ 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**.

Même à ce niveau de production, les agro-carburants posent déjà des problèmes de concurrence avec les usages alimentaires, et peuvent avoir des bilans carbone plus défavorables que les carburants fossiles, en fonction des horizons de temps considérés et de la déforestation induite. L'impossibilité de trouver des matières premières réellement vertueuses pour alimenter la raffinerie de la Mède illustre bien cette impasse⁴⁴.

⁴¹ Le Boeing 747, mis en service il y a un demi-siècle, atteignait déjà la taille des plus gros avions vendus aujourd'hui.

⁴² <http://www.fao.org/3/a-BO103f.pdf>

⁴³ En négligeant, en première approximation, les subtilités de conversion entre litres qui n'ont pas tous exactement le même contenu énergétique.

⁴⁴ <https://www.wwf.fr/vous-informer/actualites/huile-de-palme-le-gouvernement-vole-une-nouvelle-fois-au-secours-de-total>

L'industrie du transport aérien met en avant des scénarios et mécanismes dans lesquels les agro-carburants alimenteraient prioritairement l'aviation. Mais rien ne justifie cet ordre de priorité : au contraire, tant la simplification des chaînes logistiques que le souci de résilience locale plaident pour que les agro-carburants alimentent en priorité les engins agricoles, et plus largement les usages les plus répartis sur le territoire, au plus près de leur production.

D'après une étude de l'ONG Transports & Environnement⁴⁵, en Europe, **les « bio-carburants avancés », c'est-à-dire ceux qui font réellement appel à des déchets et non à des produits agricoles, ne seraient en mesure de fournir qu'au plus 10,5 à 11,4% de la consommation de carburant de l'aviation en 2050.** Et encore, ceci supposerait qu'aucun autre secteur (maritime, routier, armées, etc.) ne fasse appel lui aussi à ces carburants.

2.2.10 Voler à l'hydrogène ?

Cette « piste » doit être abordée, car elle est étonnamment souvent mentionnée par l'industrie. Il faut d'abord rappeler que la solution hydrogène (ou, plus précisément, dihydrogène) est douteuse pour l'ensemble des usages : **sa production par électrolyse n'offre qu'un mauvais rendement**, ce qui limite son domaine de pertinence aux seules situations où on disposerait d'électricité propre en surabondance. À l'inverse, 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'hydrocarbures⁴⁶, émetteur de CO₂. Au-delà de ce point, l'hydrogène appliqué à l'aviation soulève des problèmes supplémentaires :

- son stockage dans les aéroports et à bord des avions poserait des problèmes de volume tout à fait nouveaux car pour une même énergie délivrée, l'hydrogène liquéfié occupe 3 fois plus de place que le kérosène. De lourds investissements aéroportuaires (pour permettre l'approvisionnement à la fois en kérosène ou en hydrogène selon les avions) et un renouvellement de la flotte aérienne seraient à envisager⁴⁷. En raison de ces diverses contraintes, un rapport de 2015 du comité britannique sur le changement climatique considérait qu'une flotte aérienne propulsée par l'hydrogène **ne pourrait pas avoir un rôle significatif avant 2050**⁴⁸. Enfin l'ATAG elle-même, une association de compagnies et constructeurs, reconnaît qu'il reste des défis techniques à lever et ne fournit aucun horizon temporel pour le développement de l'aviation à hydrogène⁴⁹ ;
- de plus, **la combustion de l'hydrogène rejette, comparativement au kérosène, 2,6 fois plus d'eau**, à énergie délivrée égale. Ainsi l'hydrogène, même s'il atténuerait certains effets hors CO₂ (moins d'oxydes d'azote, suppression des émissions de particules), ne les supprimerait pas.

2.3 À quoi le progrès technique a-t-il servi ?

Si les possibilités de progrès technique s'avèrent si limitées, ce n'est pas que les gisements techniques sont inexistantes. C'est principalement que **la plus grande part des gisements techniques a déjà été consommée**. En effet :

- depuis longtemps dans l'aviation commerciale, l'efficacité énergétique a été un objectif important, car c'est elle qui fait le rayon d'action d'un avion, et donc sa capacité à opérer sans escales des trajets de longue distance.
- la performance, en termes de consommation, d'un avion neuf, est un déterminant essentiel de sa valeur. En effet un avion consomme au cours de sa vie plus que sa propre valeur en carburant ; de

⁴⁵ https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/2018_10_Aviation_decarbonisation_paper_final.pdf

⁴⁶ <https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/enjeux-et-prospective/decryptages/energies-renouvelables/tout-savoir-lhydrogene>

⁴⁷ Rondinelli et al, 2017. Benefits and Challenges of Liquid Hydrogen Fuels in Commercial Aviation. *International Journal of Sustainable Aviation*

⁴⁸ Scenarios for deployment of hydrogen in contributing to meeting carbon budgets and the 2050 target

⁴⁹ Beginner's Guide to Sustainable Aviation Fuel

plus, une moindre consommation constitue pour les compagnies une forme d'assurance contre les « surchauffes » du prix du pétrole. C'est pourquoi les motoristes et avionneurs ont depuis longtemps une incitation forte à mettre en œuvre les solutions techniques permettant de réduire la consommation de carburant. On pourrait aller jusqu'à dire que les ingénieurs et techniciens de l'industrie aéronautique civile sont en quelque sorte des experts de l'efficacité énergétique.

Malheureusement, mettre en œuvre des progrès d'efficacité sans se préoccuper de maîtriser les effets rebond (et, qui plus est, tout en mettant en œuvre des politiques de libéralisation et de défiscalisation favorisant le développement du trafic), n'apporte rien du point de vue du climat. **Les progrès techniques ont été mis au service non de la protection du climat, mais de l'abaissement du coût du transport aérien, et du développement du trafic.**

2.4 Bilan : perspectives réelles de progrès techniques et nécessité de la sobriété

À l'issue de ce tour d'horizon, force est de constater que les pistes de progrès techniques sont loin d'être aussi consistantes qu'on voudrait l'imaginer⁵⁰.

Les seuls progrès techniques significatifs raisonnablement envisageables à moyen terme consistent en la fin du renouvellement de la flotte, depuis les avions de la génération précédente vers la génération actuelle ; puis, éventuellement, et pour les courts et moyen-courriers seulement, le déploiement de la laminarité naturelle, et de motorisations du type de l'Open rotor.

Si aucune autre innovation majeure ne peut être attendue à moyen terme, c'est qu'il faut considérer avec réalisme certains facteurs qui ne favorisent pas le développement de nouveaux programmes de moteurs ou d'avions radicalement innovants :

- **l'impératif de sécurité**, tout d'abord, reste prioritaire. Cet impératif impose des **temps de certifications élevés**. Les innovations, surtout de rupture, mettent chaque fois potentiellement en danger cet impératif, comme l'exemple récent du Boeing 737MAX⁵¹ l'a rappelé.
- la **lourdeur des programmes industriels** : chaque programme représente des investissements se comptant en milliards d'euros, ce qui est donc chaque fois une **prise de risque industrielle**, qui ne se justifie (ou ne se justifiait) que quand le gain prévu (notamment en consommation de carburant) est suffisamment substantiel.
- enfin, du fait de la lourdeur de chaque programme, **le marché tant des moteurs que des avions est oligopolistique**, c'est-à-dire qu'il ne met en concurrence qu'un nombre très réduit d'industriels. Cela incite chacun à une attitude prudente, où préserver ses positions importe plus que de se lancer dans des initiatives risquées.

Aujourd'hui par exemple, le segment du moyen-courrier, qui représente la plus forte part du marché, se partage entre un avion dont la conception initiale remonte aux années 1980 (l'A320) et un autre dont la conception remonte aux années 1960 (le Boeing 737). Le lancement des programmes devant leur succéder est sans cesse repoussé. Comme le relève un acteur de l'aéronautique, « *il n'y a pas aujourd'hui chez les deux gros avionneurs de nouveaux programmes en développement (si j'exclus le B777X), ce qui est unique, je crois, dans l'histoire de l'aviation commerciale* »⁵².

Passer à de nouvelles motorisations de type Open rotor, ou plus encore à des architectures de rupture comme l'aile volante ou l'hybridation, imposera aux avionneurs et aux motoristes de travailler de façon plus imbriquée que pour les architectures actuelles, ce qui accentuera encore la lourdeur et le risque des programmes industriels. Cela allongera en outre les temps de certification.

⁵⁰ Peeters et al, 2016. Are technology myths stalling aviation climate policy? *Transportation Research Part D: Transport and Environment*

⁵¹ Et encore, le 737MAX ne reposait pas sur une innovation de rupture, mais sur l'amélioration d'un avion existant.

⁵² <https://www.latribune.fr/entreprises-finance/industrie/aeronautique-defense/si-boeing-voulait-remplacer-le-b737-max-que-peut-il-faire-reellement-eric-schulz-ancien-directeur-commercial-d-airbus-834401.html>

Ainsi **le progrès technique n'est pas en mesure de compenser l'augmentation prévue du trafic aérien. Pour en contenir l'impact sur le climat, il est incontournable de remettre en question la croissance du trafic.**

3 L'attitude de déni des compagnies aériennes... et de l'État

Bien entendu, cette nécessité de la sobriété reste difficile à admettre, pour les acteurs du secteur. Force est de constater que leurs positions restent encore déterminées par une forme de déni des enjeux.

3.1 Les compagnies aériennes continuent d'ignorer les enjeux et de pratiquer le greenwashing...

Le document édité en décembre 2019 par un groupe d'acteurs du transport aérien⁵³, annonçant répondre « *aux idées reçues sur le transport aérien* », fournit un exemple récent de l'attitude actuelle de ces acteurs.

On y constate tout d'abord que les acteurs du transport aérien **minimisent les enjeux**, par exemple en répétant que le secteur représenterait 2% des émissions de CO₂ mondiales : ceci est factuellement faux, le véritable chiffre étant de 3,3%⁵⁴. Mais surtout, ce n'est pas là la question, car cette proportion diffère selon les pays, et car le CO₂ n'est pas la totalité de l'empreinte climatique : l'aviation représente en réalité 6% environ de l'empreinte des Français⁵⁵.

Dans ce même **esprit de confusion des ordres de grandeur**, les acteurs du transport aérien **mettent largement en avant des actions qui malheureusement ne portent que sur des points secondaires** de l'impact de l'aviation : bâtiments et opérations aéroportuaires, etc. Ils vont jusqu'à faire valoir leurs actions de gestion écologique des prairies aéroportuaires, ce qui prête à sourire quand on se souvient que les contraintes de sécurité, et notamment la prévention du « péril aviaire », imposent d'éloigner les oiseaux des aéroports, donc notamment d'éviter tout véritable aménagement environnemental des délaissés⁵⁶.

À de nombreuses reprises, les acteurs mettent en avant les engagements pris dans le cadre du système CORSIA. Au-delà du recours à la compensation prévue par CORSIA, l'argument n'a pas davantage de valeur que prétendre que, parce qu'elle a signé l'accord de Paris, la France atteindra la neutralité carbone.

Enfin, de manière inquiétante, **les acteurs du transport aérien apparaissent ignorer l'impact climatique hors CO₂, ou à tout le moins, ont décidé de ne pas le prendre en compte**, alors qu'il représente *a priori* au moins la moitié des impacts de l'aviation sur le climat⁵⁷. Ceci ne peut qu'empêcher l'exploration des pistes techniques de réduction de ces impacts.

3.2 ... voire de prendre des décisions irresponsables

Pour mettre en perspective les déclarations volontaristes des acteurs du transport aérien, telles que « *le secteur du transport aérien agit pour le climat depuis de nombreuses années* », ou encore « *l'industrie aéronautique cherche à maîtriser son impact sur le climat* », on soulignera :

- le choix récent de Hop!, filiale d'Air France, pour « rationaliser » sa flotte, d'en **sortir les appareils turbo-propulseurs plus économes en carburant** (voir contrepartie technique n°2, p20)
- la persistance de la pratique du « **fuel tankering** », consistant à embarquer, aux aéroports où le carburant est moins cher, plus que le carburant nécessaire au prochain vol, ce qui peut certes réduire

⁵³ <https://www.aeroport.fr/uploads/documents/triptyque-%22stop-aux-idees-recues-dans-le-transport-aerien-!%22.pdf?v12>

⁵⁴ 0,93 GT/an d'émissions directes, soit 1,1 GT/an avec l'amont (CO₂ émis pour l'extraction, le raffinage et l'acheminement des carburants consommés par l'aviation), à rapporter à 33 GT/an de CO₂ d'origine fossile.

⁵⁵ Voir ce « manuel », dont il est question plus loin : 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

⁵⁶ Il est d'ailleurs pour le moins confondant de trouver, dans le document cité, une comparaison entre superficie totale des aéroports français, et superficie des parcs nationaux, comme si la qualité de ces espaces était en quelque point comparable.

⁵⁷ On serait d'ailleurs curieux de savoir, parmi les salariés des compagnies aériennes et aéroports, ou même parmi leurs seuls cadres, quelle proportion est consciente de l'existence et de l'ampleur des effets climatiques hors CO₂.

les coûts, mais au prix d'une consommation de carburant augmentée (voir contrepartie technique n°3, p23).

Bien entendu, les surconsommations de carburant associées à chacun de ces deux exemples sont faibles en regard de la consommation totale du secteur, et même en regard de son augmentation annuelle. Il n'empêche qu'ils illustrent l'attitude réelle du secteur aérien vis-à-vis de sa consommation de carburant : **les compagnies aériennes considèrent qu'un litre de kérosène vaut les 0,60 € environ auxquels il leur est vendu**, et ne font des efforts pour s'en montrer économes que lorsque ces efforts sont rentables.

4 Pour agir, que peut faire l'État immédiatement ?

4.1 L'État, loin de donner la direction d'une transition, répercute les argumentaires de l'industrie

Malheureusement, **l'État ne remplit aujourd'hui nullement le rôle qui devrait être le sien.**

Après des « Assises du transport aérien » qui ne donnèrent pas lieu à une discussion sérieuse de l'impact climatique de l'aviation, et qui se conclurent sur une absence de décisions notables⁵⁸, le Gouvernement fut confronté, au printemps 2019, lors de l'examen à l'Assemblée de la loi d'orientations des mobilités, à de nombreux amendements, déposés par différents députés, tendant à une augmentation de la fiscalité du transport aérien.

L'argumentaire utilisé alors par le Gouvernement, et en l'occurrence par sa Ministre des Transports, pour défendre le *statu quo*, était tellement truffé d'inexactitudes et de déformations de la réalité, qu'il donna lieu à un décodage extensif⁵⁹ de la part du *Shift Project*. Cet épisode se conclut par l'annonce, dans le cadre du Conseil de défense écologique de juillet 2019, d'une « écotaxe » venant augmenter la légère taxe Chirac déjà existante.

Le seul fait qu'une Ministre ait pu recevoir un argumentaire aussi mensonger, vraisemblablement produit par son administration, sans qu'aucun contrepoids interne n'ait identifié qu'il la mettrait en difficulté, démontre certainement combien l'État s'est habitué à ne pas manifester un état d'esprit et une volonté différents de ceux des compagnies et acteurs du secteur.

La crise actuelle qui touche l'ensemble du secteur est une opportunité pour le Gouvernement de revenir sur ses positions antérieures et définir et appliquer une politique ambitieuse en phase avec les objectifs de l'Accord de Paris.

De ce qui précède, une première conclusion peut être tirée : **toute politique de réduction des émissions de CO₂ liées au trafic aérien qui n'inclurait pas des mesures de sobriété (maîtrise de l'effet rebond) devra être considérée comme insincère.** En partant d'un objectif de réduction des émissions de CO₂ de 5%/an, les propositions suivantes font partie des mesures incontournables que les pouvoirs publics doivent mettre en œuvre immédiatement, avec effets dans les 5 prochaines années, pour être fidèles aux engagements du pays en matière de climat.

Car c'est bien aux États qu'il revient de planifier dès maintenant l'avenir du transport aérien. Ce n'est que dans un cadre cohérent, clair et stable que la transformation pourra s'opérer le plus sereinement possible pour les entreprises, les salariés et les usagers. Cette planification devra mobiliser les leviers techniques et organisationnels disponibles, et organiser dès maintenant la réduction du trafic aérien à long terme.

⁵⁸ Quand on se trouve au bout de la démarche d'ouverture à la concurrence et d'abaissement des coûts, le politique se retrouve logiquement dépourvu de marges de manœuvre significatives, que ce soit pour persévérer dans cette démarche ou pour en atténuer les inconvénients.

⁵⁹ The Shift Project, « Petit manuel d'auto-défense intellectuelle sur l'avion, le climat et la fiscalité en France », 2019 https://theshiftproject.org/wp-content/uploads/2019/06/2019-05-31_Avion-climat-et-fiscalit%C3%A9-Petit-manuel-dauto-d%C3%A9fense-intellectuelle_V3.pdf

4.2 Appliquer les (quelques) mesures techniques décarbonantes à disposition immédiate

Proposition n°1 : Appliquer les (quelques) mesures techniques décarbonantes à disposition immédiate.

4.2.1 Décarboner les opérations au sol

Contrepartie technique n°1 : Accélérer la décarbonation des opérations au sol, notamment en assurant la majorité des roulages par des tracteurs électriques.

Acteurs concernés par la mesure

Compagnies aériennes ; aéroports

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 d'énergie significative et au-delà des émissions de CO₂ non moins significatives.

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 du groupe auxiliaire de puissance 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 :

- Fonction n°1 : L'alimentation électrique (400 Hz et 28 VDC) aux systèmes embarqués ;
- Fonction n°2 : Le démarrage des moteurs principaux lors de la phase de "poussage" ;
- Fonction n°3 : La puissance pneumatique nécessaire au contrôle de la température du cockpit et de la cabine.

Les APU sont généralement positionnés à l'arrière de l'avion, dans le cône de queue, et alimentés par le kérosène des réservoirs de l'avion.

Le recours à l'APU est la principale source d'émissions de CO₂ lorsque l'avion est statique et représente pour l'ensemble des vols touchant le territoire français **0,3 MtCO₂** (1,2% de l'ensemble des émissions du transport aérien).

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 et la consommation en carburant 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 carburant annuelle relative à l'utilisation de l'APU est estimée à 50 000 tonnes de kérosène (~ 60 m³) et les émissions associées de CO₂ à 0,15 MtCO₂ (données 2019). Il existe deux alternatives à l'utilisation de l'APU pour climatiser la cabine au sol. Celle principalement utilisée, l'ACU ou groupe mobile, 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 émission CO₂ 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.

Levier n°2 : Réduire l'usage des moteurs 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 environ 6% de leur carburant pour se propulser à l'aide de leurs moteurs. Ces activités engendrent des émissions de CO₂ de l'ordre de **1 MtCO₂/an**⁶⁰.

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 le moteur LEAP motorisant les A320neo ou B737max). C'est ce qu'on appelle le « *Single Engine Taxi-In* » (SETI) ou « *Taxi-out* » (SETO).

De nombreuses compagnies aériennes (50% à dire d'experts) pratiquent déjà le SETI. Le SETO est en revanche moins utilisé⁶¹ (20% à dire d'experts). Si 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 peuvent en partie expliquer la faible mise en œuvre de ces pratiques, il semble qu'un frein majeur soit davantage la difficulté à faire évoluer les habitudes et les procédures de pilotage dans certaines compagnies aériennes.

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 que celle d'un turboréacteur (~ - 85%⁶²). Au-delà un système alimenté à l'électricité pourrait également être développer à courte échéance.

La mise en œuvre de ce système de traction électrique nécessite un certain nombre de modification sur l'avion et une formation des pilotes, probablement réalisable en moins de 5 ans.

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. Couvrir l'ensemble des départs et arrivées (taux de disponibilité de 90%) nécessiterait une quantité très significative de systèmes de traction. L'impact de leur usage serait plus important pour les phases de *Taxi-out* (pour lesquelles le SETO est par ailleurs peu appliqué, cf. plus haut). Un taux de 30% d'utilisation est une valeur ambitieuse mais accessible d'ici 5 ans.

Les couts d'installation pourraient en toute vraisemblance être mutualisés dans la redevance aéroportuaire.

Description détaillée de la contrepartie

Levier n°1

Imposer d'ici 5 ans la substitution de l'APU par des groupes de parcs électriques pour les aéroports de Paris-Charles de Gaulle et Orly.

Levier n°2

- Rendre immédiatement obligatoire la pratique du roulage après l'atterrissage (*Taxi-in*) avec un seul moteur allumé (SETI) ;

⁶⁰ Calcul détaillé en Annexe.

⁶¹ 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 2^{ème} moteur.

⁶² Voir site de TLD : <https://www.tld-group.com/fr/>

- Rendre immédiatement obligatoire 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 (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 certification des pilotes la maîtrise des systèmes de traction électriques ;
- Rendre obligatoire pour l'ensemble des compagnies aériennes opérant en France, la compatibilité des appareils avec le système de traction électrique.

Impact CO₂

Levier n°1

La substitution de l'APU par des groupes de parcs électriques pour les aéroports de Paris-Charles de Gaulle et Orly permet une réduction de la consommation de carburant de 60 000 tonnes de kérozène par an et une réduction des émissions de CO₂ associée de **0,2 MtCO₂/an**.

Levier n°2

En considérant qu'aujourd'hui pour 50% des vols le SETI est mis en œuvre, et que pour 20% des vols le SETO est mis en œuvre, la réduction des émissions de CO₂ liée à la généralisation du SETI et du SETO est de :

- **0,03 MtCO₂/an** pour la mise en œuvre du SETI seul
- **0,07 MtCO₂/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 30% des vols pour la phase de Taxi out (le reste des vols mettant en œuvre le SETI/SETO) la réduction des émissions de CO₂ pourrait atteindre **0,3 MtCO₂/an en 2025**, soit une réduction totale de **0,75 MtCO₂ au entre 2021 et 2025**.

NB : si le système de traction électrique était utilisé pour 90% des Taxi-in et Taxi-out, les gains seraient de 0,9 MtCO₂/an en 2025

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 ;
- 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.

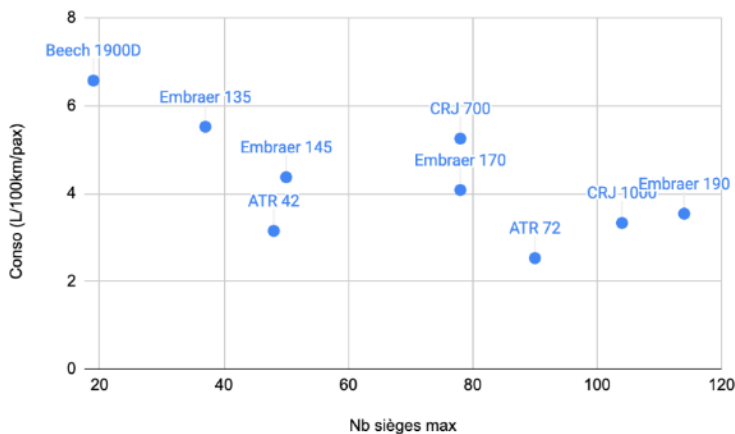
Impact sur les compagnies aériennes et les aéroports

Évolution des procédures de pilotage et de contrôle à mettre en œuvre (voir Annexe pour davantage de détail).

Pas de perte de compétitivité car les contreparties proposées concerneraient toutes les compagnies aériennes opérant sur les aéroports français.

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.

4.2.2 Remplacer les turboréacteurs de petite capacité par des appareils à hélices

Contrepartie technique n°2 : Remplacer les turboréacteurs de petite capacité par des appareils à hélices.	
Acteurs concernés par la mesure	Compagnies aériennes ; aéroports
Éléments de contexte	
Les appareils utilisés dans les flottes des compagnies aériennes peuvent être, en simplifiant, équipés de deux types de technologie de motorisation : les turboréacteurs et les turbopropulseurs (moteur à hélices). Chacune de ces technologies implique des conditions optimales de vols (vitesse, altitudes, etc.). En d'autres termes, chacune d'elle est plus ou moins adaptée (en matière de consommation notamment) selon le trajet et le vol souhaités. Il reste que les turbopropulseurs sont moins consommateurs que les turboréacteurs (de -30% à -40%)⁶³, et plus encore pour la phase de décollage. Par ailleurs, les caractéristiques techniques des appareils équipés de turbopropulseurs impliquent des vols nettement moins rapides (-30%⁶⁴) et nettement moins haut⁶⁵ limitant la grande majorité des effets climatiques hors CO₂. La plupart des avions équipés de turbopropulseurs, sont aujourd'hui des appareils de 50 à 100 places. L'industrie européenne est très bien positionnée sur ce segment avec les appareils ATR de conception et fabrication européenne (franco-italiens)⁶⁶.	
 Consommation et capacité des appareils des turbojets et turbopropulseurs de moins de 120 places.	
En ce qui concerne les vols court-courriers (<1000 km), les deux types de motorisations sont utilisés avec des performances de consommation très différentes. Ainsi, au-delà d'une consommation de carburant intrinsèquement plus importantes, les appareils équipés de turboréacteurs utilisés sur le segment court-courrier, de petite taille, sont moins bien optimisés que ceux d'avions plus gros, utilisés pour des vols long-	

⁶³ À titre d'exemple, le remplacement d'un turbojet CRJ700 (5.25L / siège.100km) par un ATR72 de même capacité (2.53 L/siège.100km) représente un gain de consommation de 40-45% (cf. Annexe 1). Voir également « [ATR : 3000 nouveaux turbopropulseurs d'ici 20 ans](#) », AirJournal (juillet 2018).

⁶⁴ Vitesses de croisière max : 818km/h pour le CRJ-700 vs 590km/h pour l'ATR72. Voir www.atraircraft.com

⁶⁵ 12500m=41000ft pour le CRJ-700 et 7600m=25000ft pour l'ATR72. Voir www.atraircraft.com

⁶⁶ Voir « [ATR ou l'incroyable résurrection d'un constructeur d'avions à hélices](#) », La Tribune (février 2012).

courriers. À cette différence de consommation, il faut ajouter l'impact hors CO₂ des turboréacteurs, quand le vol est suffisamment long pour leur permettre d'atteindre leur altitude de croisière.

L'augmentation du temps de trajet induite par l'usage de sur les vols intérieurs (<1000 km) serait marginale, de l'ordre de 15 à 20 minutes 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.

Dans cette perspective, on ne peut que regretter le choix de « rationalisation » récent de Hop!, filiale d'Air France, entraînant l'exclusion du service actif **des appareils turbopropulseurs (avions à hélices ATR42 et 72)⁶⁷ plus économes en carburant**, pour ne garder que les turboréacteurs (Embraer 145, 170, 190, Bombardier CRJ-700 et 1000), qui consomment moitié plus de carburant par passager, en particulier sur les courtes liaisons concernées, tout en étant conçus et fabriqués hors de l'UE. Ce choix, effectué au moment même de la prise de conscience de la gravité du changement climatique, est pleinement effectif depuis début 2020.

La compagnie Hop ! détient 45% des appareils commerciaux de moins de 105 places parmi les compagnies françaises⁶⁸, mais surtout 79% des turbojets de moins de 105 places des compagnies françaises⁶⁹.

Description détaillée de la contrepartie

Pour l'ensemble des vols dont la capacité est inférieure à 105 place et pour l'ensemble des compagnies aériennes exerçant une activité en France, interdire d'ici 2025 l'opération de turbojets commerciaux (CRJ700 / 1000 et Embraer 135, 145, et 170). Pour ces vols, seuls les turbopropulseurs (de type ATR 72 ou 42), ou une alternative technique moins consommatrice de carburant, sont autorisés.

NB : cette mesure est couplée avec la mesure visant à suspendre les liaisons aériennes pour lesquelles il existe une alternative ferroviaire pertinente (contrepartie sobriété n°1) et avec la mesure instaurant une décroissance de la consommation moyenne de carburant (contrepartie sobriété n°4).

Impact CO₂

Impact CO₂ de la mesure pour la compagnie Hop !

Dans le cas du remplacement des turbojets de moins de 105 places, l'économie de CO₂ réalisée serait de :

- **0,075 MtCO₂/an**, toute chose égale par ailleurs, soit une réduction de 25% par rapport aux émissions actuelles.
- **0,056 MtCO₂/an**, avec prise en compte de certaines liaisons aériennes domestiques (*contrepartie sobriété n°1*), soit 26% des émissions de la compagnie après report modal.

Estimation de l'impact pour les compagnies aériennes françaises

En extrapolant les valeurs obtenues pour la compagnie Hop ! aux autres compagnies françaises, le gain total pourrait être de :

- **0,094 MtCO₂/an**, toute chose égale par ailleurs.
- **0,064 MtCO₂/an**, avec prise en compte de certaines liaisons aériennes domestiques.

⁶⁷ https://fr.wikipedia.org/wiki/Air_France_Hop

⁶⁸ Les compagnies françaises qui opèrent des turbojet dont la capacité est inférieure à 105 places sont Amelia, ASL Airlines France, Pan Européenne air service, Pan Européenne air service, Val Jet.

⁶⁹ www.airfleets.fr

NB 1 : Le gain CO₂ pourrait être encore augmenté en étendant la mesure à toutes les compagnies (françaises ou non) opérant sur le sol français.

NB 2 : Un gain supplémentaire hors CO₂ est attendu, du fait du vol à plus basse altitude (plafond à 7,6 km, contre 12,5 km pour les turbojets). Étant difficilement chiffrable, celui-ci n'a pas été comptabilisé.

Externalités engendrées

Qualité de service

- Temps de trajet : les temps de vol sont légèrement augmentés (moins de 20 min de plus pour un Paris-Toulouse). Un allongement supplémentaire vient du fait que les turbopropulseurs débarquent souvent aux terminaux les plus éloignés, notamment dans les gros aéroports.
- « *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, 15-20 dB de moins qu'un jet de taille similaire). Le bruit intérieur est similaire (environ 79 dB).

Externalités économiques

- Gestion du trafic aérien : les turbopropulseurs sont plus lents, la régulation du trafic peut être ponctuellement plus compliquée, en particulier à proximité des gros aéroports.
- Coût du remplacement des appareils. (à mettre en regard de l'aide publique à AF).
- Coûts de maintenance des turbopropulseurs plus élevés (opérateurs).

Externalités sur les emplois

- Le léger allongement du temps de vol a l'avantage d'augmenter légèrement les emplois de personnels 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).
- L'impact emploi est globalement positif (accélération du remplacement naturel des flottes).

Risque de contournement ou de conséquence contre-productive

- Augmentation de fréquence, si l'avion est remplacé par un avion plus capacitaire
- Contournement de la règle en faisant voler des turbojets plus gros, restant autorisés, avec des taux de remplissage relativement faibles.

Proposition de gestion des externalités

Qualité de service

- « *Standing* » et impression de sécurité : l'image de l'avion à hélice est à refaire. A 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.

Externalités économiques

- Coût de maintenance des compagnies : le système de bonus / malus aident 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.

4.2.3 Limiter fortement le Fuel Tankering

Contrepartie technique n°3 : Limiter fortement le <i>Fuel Tankering</i> .	
Acteurs concernés	Compagnies aériennes
Éléments de contexte	
Le « <i>fuel tankering</i> » 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 <i>refueling</i> 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 : - 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 MtCO₂/an. 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 de la contrepartie	
Interdire cette pratique à l'ensemble des compagnies aériennes opérant des vols au départ ou à destination de la France, sauf, à titre dérogatoire, lorsque le ratio coût carbone / économie monétaire dépasse un seuil, à fixer à un niveau de l'ordre de 500 € par tonne de CO₂ (valeur tutélaire recommandée pour 2030, multipliée par 2 pour tenir compte des effets climat hors CO₂).	
Impact CO ₂	
L'impact européen évalué par Eurocontrol est de 0,9 MtCO₂ par an. La sur-émission d'Air France peut être estimée entre 0,055 et 0,11 MtCO₂ par an, au niveau de trafic de 2018. À titre d'ordre de grandeur à préciser, on retiendra que la mesure décrite ici conduit, pour le seul cas d'Air France, l'émission d'environ 0,1 MtCO₂.	
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,	

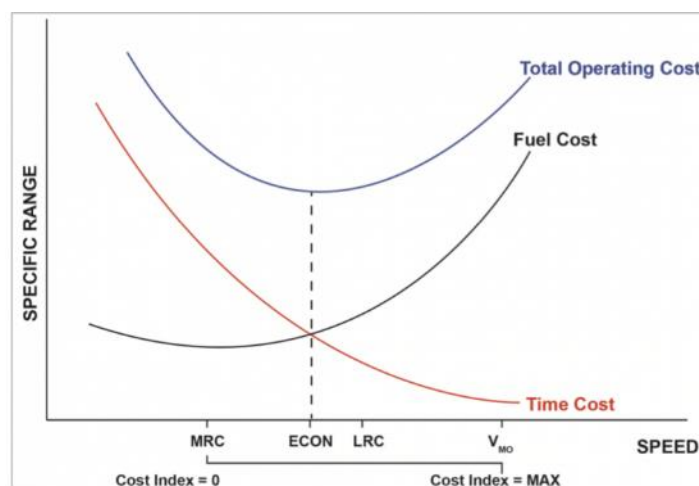
dans certains cas (trajets intercontinentaux au départ de villes de province françaises), les transporteurs étrangers seront en moyenne plus fortement touchés qu’Air France par l’obligation. Air France serait pénalisée d’une somme estimée entre 18 et 36 M€ par an sans réglementation globale des prix 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.

4.2.4 Abaisser le « Cost Index » au maximum

Contrepartie technique n°4 : Imposer à l’ensemble des compagnies aériennes opérant en France de réduire le Cost Index de leurs vols à 0.	
Acteur 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 cout du carburant (CC) en €/L ; - Le cout 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 est directement proportionnelle à la vitesse alors que les dépenses de salaires et de maintenance sont directement proportionnelles aux nombres d’heures de vol effectuées. Afin d’optimiser la trajectoire d’un avion en fonction des couts liés à l’exploitation d’une ligne, les compagnies aériennes utilisent un indicateur appelé le <i>Cost Index</i> (CI) défini selon la formule suivante : $CI = CT / CC$ Ce paramètre est notamment utilisé dans les systèmes de gestion de vol pour piloter le Mach de vol⁷⁰ (vitesse optimale, également appelée ECON), 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). Les valeurs du CI sont typiquement de 10 à 50 pour une compagnie aérienne comme Air France⁷¹.	

⁷⁰ Cook, A., Tanner, G., Williams, V. and Meise, G. Dynamic cost indexing, 6th EUROCONTROL Innovative Research Workshops and Exhibition, December 2007

⁷¹ Voir site de [l’International Virtual Aviation Organisation](http://www.internationalvirtualaviation.org)



Un CI de 0 correspond au cas pour lequel la trajectoire de l'avion est la plus optimisée en matière de consommation de carburant⁷² et permet dans ce cas à l'avion d'atteindre son rayon d'action maximum.

Description détaillée de la contrepartie

Pour l'ensemble des vols touchant le territoire français opérés par une compagnie aérienne (française ou étrangère), imposer par voie réglementaire la prise en compte d'un *Cost Index* du vol égal à 0.

Impact CO₂

En moyenne, cette mesure permettrait d'économiser 0.5% à 1% du carburant consommé (et donc les émissions de CO₂ associées) par l'ensemble du transport aérien⁷³. En appliquant ce niveau de réduction aux émissions du transport aérien français, le gain serait compris entre **0,11 et 0,23 MtCO₂/an**

Externalités engendrées

Forcer les compagnies à voler à CI=0 risque d'induire une augmentation des retards (impossibilité de varier la vitesse de croisière pour pallier aux aléas des opérations au sol).

⁷² Pour un CI de 0 le prix du carburant est « infini » (CC très grand devant CT).

⁷³ 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

4.3 Planifier et organiser la réduction de la consommation de carburant

Proposition n°2 : Planifier et organiser par voie réglementaire la réduction de la consommation de carburant du trafic aérien au départ ou à destination du territoire français.

Une discussion informée sur la limitation du transport aérien nécessite certainement de dessiner ce à quoi peut ressembler, concrètement, cette limitation.

Le premier point à souligner est que, dans le contexte de très forte croissance actuelle du trafic aérien (de l'ordre de +4% par an en France), **une action de « limitation », même vigoureuse, se traduirait d'abord par une limitation de la croissance du trafic, et non par une décroissance.** Les effets sociaux d'une décroissance sectorielle prolongée ne seraient donc à craindre que si une limitation extrêmement drastique était mise en œuvre.

Il faut souligner aussi que, **il y a quelques décennies seulement, le trafic aérien était très faible en regard de ce qu'il est aujourd'hui** (le trafic touchant la France a été multiplié par 5 en 40 ans), ce qui n'empêchait manifestement pas notre pays ni d'être une puissance industrielle, ni d'être ouvert sur l'étranger.

Si on veut, à titre d'exemple, se représenter ce qu'impliquerait une division par 2 du trafic, on peut imaginer :

- ou bien, que les déplacements seraient deux fois moins fréquents, mais avec un séjour sur place deux fois plus long. Pour ne prendre l'exemple que du tourisme⁷⁴, ce ne serait manifestement une catastrophe ni pour le vacancier, ni pour l'économie du pays visité. On peut penser au contraire que cela contribuerait à faire émerger un tourisme plus attentif à la compréhension réelle des lieux visités.
- ou encore, alternativement, et toujours sur l'exemple du tourisme, que celui-ci serait redirigé vers des destinations deux fois moins éloignées, en moyenne. Là encore, cela pourrait faire sens, selon un critère géopolitique qui privilégierait la connaissance mutuelle entre peuples voisins.

Les mesures qui suivent regroupent ainsi les principaux leviers d'introduction de la sobriété dans le transport aérien.

⁷⁴ Le tourisme représente en effet plus de la moitié du trafic. Plus précisément, les voyages privés, majoritairement touristiques, représentent 72% du trafic, tandis que les voyages d'affaires forment les 28% restants (DGAC, 2017, Enquête nationale auprès des passagers aériens). On se gardera cependant d'établir une hiérarchie entre usages, d'autant plus que les voyages d'affaires comprennent une part de « tourisme d'affaires », ou de voyages ayant une dimension de gratification de leur bénéficiaire.

4.3.1 Supprimer les liaisons domestiques et internationales lorsqu'une alternative ferroviaire existe

Contrepartie sobriété n°1 : Supprimer les liaisons aériennes (domestiques ou internationales) là où l'alternative ferroviaire est satisfaisante (voyage <4h30 à une fréquence suffisante).	
Acteurs concernés par la mesure	Compagnies aériennes
Éléments de contexte	
Le transport ferroviaire comporte, en France, un avantage très significatif en raison des très faibles émissions de CO₂ que son utilisation engendre. Pour le même trajet, un voyage en train émet ainsi en moyenne entre 30 et 40 fois moins de CO₂ qu'un voyage en avion⁷⁵. Pour un grand nombre de liaisons aériennes domestiques ou internationales (principalement à destination de pays frontaliers), une alternative ferroviaire « pertinente » existe. En plus de desservir des gares situées dans les centres-villes, l'offre ferroviaire permet de réaliser des trajets dont la durée ou la fréquence peuvent être considérées comme satisfaisantes et comparables à celles du transport aérien. Dans ce qui suit, il sera considéré qu'une durée de voyage de 4h30 est satisfaisante et acceptable. Il existe en France 36 lignes liaisons aériennes domestiques pour lesquelles une alternative ferroviaire (grande vitesse ou vitesse conventionnelle) dont la durée de trajet est inférieure à 4h30. Il existe une 11 liaisons internationales au départ de Paris vers les pays frontaliers pour lesquels une alternative ferroviaire dont la durée de trajet est inférieure à 4h30. Dans ce cadre, la question de la suspension des liaisons aériennes pour lesquelles une alternative ferroviaire satisfaisante existe est donc pertinente. 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 sens⁷⁶. Dans le cas de l'arrêt d'une liaison aérienne, il importe qu'en parallèle le plafond réglementaire du trafic sur les aéroports concernés (ORY) soit abaissé, afin d'éviter que les créneaux aéroportuaires soient attribués à d'autres compagnies pour d'autres liaisons. En ce qui concerne la suspension des liaisons aériennes internationales, des précédents existent. 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 2019⁷⁷. Il faut distinguer les trajets directs (ou "point à point") et trajets de correspondance (pour rejoindre un hub comme Roissy GDG). Il faut préserver les trajets en correspondance, afin de permettre l'alimentation des vols internationaux sur hub aéroportuaires en 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 est suspendue.	
Description détaillée de la contrepartie	

⁷⁵ En prenant un facteur d'émission de 3,7gCO₂/p.km pour le TGV et 5,6gCO₂/p.km (bas carbone ADEME) et de 150g/pass.km pour l'avion (référence DGAC).

⁷⁶ Voir la proposition de loi visant à remplacer les vols intérieurs par le train Batho, Panot, Ruffin du 3 juin 2019.

⁷⁷ Voir [l'article des Echos](#) du 11/03/2019. Voir également [le texte de la motion portée](#) (en néerlandais).

D'ici 2025, les liaisons aériennes suivantes sont suspendues :

- **les 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 :

PARIS – MARSEILLE	LYON – RENNES
PARIS – MONTPELLIER	LYON – STRASBOURG
PARIS – BREST	LILLE – LYON
PARIS – TOULON	LYON – METZ/NANCY
PARIS - CLERMONT-FERRAND	MARSEILLE – TOULOUSE
PARIS - BALE/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

Certains vols en correspondance, notamment vers Roissy-Charles de Gaulle sont maintenues (voir détails ci-dessous).

- **les liaisons aériennes internationales au départ de Paris substituables par un trajet en train d'une durée inférieure à 4h30⁷⁸.** 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 – Francfort
CDG – Heathrow	CDG – Amsterdam
CDG – Luton	CDG – Bruxelles
CDG – Southend	ORY – London City
CDG – Genève	ORY – Genève
CDG – Zurich	

Cette proposition devra faire l'objet de discussion avec les partenaires européens et suisses concernés.

Le plafond réglementaire du trafic sur l'aéroport d'Orly est diminué du nombre de vols correspondant.

⁷⁸ Concernant les vols internationaux, les lignes pour lesquelles existe un trajet en train substituable de moins de 4h au départ de Paris-Charles De Gaulle et Paris-Orly sont : Luton, Heathrow, Gatwick, Southend, London City, Genève (CDG et ORY), Zurich, Francfort, Amsterdam et Bruxelles.

Impact CO ₂
La suspension de l'exploitation des lignes domestiques listées ci-dessus permettraient de réduire les émissions de CO₂ du transport aérien près de 0,7 MtCO₂ d'ici 2025 soit 30% des émissions du trafic aérien domestique (~2,3 MtCO₂ en 2018⁷⁹). La suspension de l'exploitation des lignes internationales à destination de pays frontaliers listées ci-dessus permettraient de réduire les émissions de CO₂ du transport aérien près de 0,15 MtCO₂ d'ici 2025 soit moins de 1% des émissions du trafic aérien international (~17,9 MtCO₂ en 2018⁸⁰).
Externalités engendrées
La diminution du nombre de lignes aériennes domestiques et internationales vers les pays frontaliers engendrerait : - Une diminution du nombre d'emplois (personnel navigant, commercial, pilotes, compagnies aériennes exploitant ces lignes) - Une diminution du nombre d'emplois dans les zones aéroportuaires concernées (personnel de l'aéroport et bassin économique de l'aéroport)

⁷⁹ Voir « Les émissions gazeuses liées au trafic aérien - Données 2018 », DGAC (2020)

⁸⁰ Voir « Les émissions gazeuses liées au trafic aérien - Données 2018 », DGAC (2020)

4.3.2 Interdire les vols « aviation d'affaires » pour motifs privés

Contrepartie sobriété n°2 : Interdire les vols « aviation d'affaires » pour motifs privés.	
Acteurs concernés par la mesure	Acteurs de l'aviation d'affaires ; aéroports
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 « jet privé ». Cette catégorie du transport aérien représente 0.4% du trafic passager en Europe en 2017⁸¹ en croissance de 3,7%. La France est le pays qui enregistre le plus d'activité avec près de 20% du total des décollages en Europe en 2017. Cette activité est en croissance de 2,6% par rapport à 2016⁸². 96,3%⁸³ des voyages sont réalisés à des fins privées (commerciales ou non), le reste correspondant aux activités médicales, militaires ou de formation. La flotte d'avion d'affaires françaises est constituée de plus de 400 appareils, dont 64% sont équipés de turboréacteurs. En Europe, l'aviation d'affaires contribue à hauteur de 2% des émissions CO₂ globales du transport aérien, soit près de 0,4 MtCO₂ si ce taux est appliqué au périmètre français⁸⁴. Ce chiffre en apparence limité, n'a de sens que s'il est rapporté aux passagers. Or, par sa nature, l'aviation d'affaires conduit à un faible taux d'occupation de la cabine. Il existe malheureusement peu de statistiques accessibles publiquement, mais on peut estimer que cette valeur se situe autour de 40%⁸⁵. La moyenne européenne se situe à 4,7 passagers par vol. Par ailleurs, 40% des vols d'affaires seraient réalisés à vide. On peut estimer ainsi qu'un passager utilisant l'aviation d'affaires consomme - en fonction du type d'avion considéré - 3 à 20 fois plus de carburant que s'il avait utilisé l'aviation commerciale⁸⁶. Le principal intérêt pour les clients de l'aviation d'affaires, réside dans le niveau de service proposé et dans la flexibilité du voyage⁸⁷. Les liaisons se font le plus souvent entre des grandes villes qui, dans 66% des cas, sont connectées par un autre moyen de transport (train ou avion commercial sans escale). Les trajets les plus parcourus en jet au départ de la France sont : - Paris-Londres - Paris-Nice - Paris-Milan - Nice-Moscou - Paris-Genève	

⁸¹ Voir "[European business aviation economic value & business benefits](#)", EBAA (2018)

⁸² Ibid

⁸³ Ibid

⁸⁴ Ibid

⁸⁵ En considérant la composition de la flotte française d'appareils privés (voir rapport EBAA), un appareil comporte en moyenne 12 sièges. Une estimation du taux d'occupation moyen peut alors être faite à partir du nombre moyen de passagers par vol privé en Europe (4,7 passager par vol), soit 40%.

⁸⁶ Le rapport entre les émissions par passager d'un vol d'affaires et d'un vol commercial est établi à partir du nombre moyen de passagers par vol d'affaires (4,7 passagers par vol en moyenne, cf. EBAA 2017), et dépend du type d'appareil considéré. Il ne sera que de 3 pour un avion à turbopropulseurs de petite taille, mais d'environ 20 pour un business airliner (dont les versions commerciales transportent plus de 140 passagers). Les émissions totales de l'appareil étant à répartir entre le nombre effectifs de passagers à bord, les émissions de CO₂ sont d'autant plus importantes sur les appareils de grosse taille, dont la capacité passagère est réduite au profit d'un luxe plus conséquent à bord (salles de conférence, canapés, chambres à coucher, douches).

⁸⁷ Ces voyages en jets privés réduisent le temps de transport de 127 minutes par vol en moyenne.

- Nice-Genève
Description détaillée de la contrepartie
Compte tenu de l'empreinte significative de l'aviation d'affaires, il apparaît pertinent de suspendre progressivement, sur une période de 5 ans, l'ensemble des autorisations de vols touchant le territoire français qui concerne cette catégorie du transport aérien. Les vols de natures militaires ou gouvernementales, médicales ou de formation sont exemptés.
Impact CO₂
2% des émissions du trafic aérien soit environ 0,4 MtCO₂ d'ici 2025.
Externalités engendrées
La suppression progressive de l'aviation d'affaire en France engendrerait : - Une diminution du nombre d'emplois (personnel navigant, commercial, pilotes, compagnies aériennes exploitant ces lignes) ; - Une diminution du nombre d'emplois dans les zones aéroportuaires concernées (personnel de l'aéroport et bassin économique de l'aéroport) ; - Une diminution du nombre d'emplois chez les constructeurs en proportion de leur part de marché pour l'aviation d'affaires en France.

4.3.3 Restreindre les avantages liés aux programmes de fidélité

Contrepartie sobriété n°3 : Restreindre les avantages liés aux programmes de fidélité (notamment le système de « miles »).	
Acteurs concernés par la mesure	Compagnies aériennes ; voyageurs bénéficiant du programme de fidélité
Éléments de contexte	
Mis en œuvre par les compagnies américaines dans les années 80⁸⁸, les programmes de fidélité par <i>miles</i> sont des outils marketing qui visent à récompenser les voyageurs fréquents en leur accordant des points de fidélité, appelés <i>miles</i>. Ces <i>miles</i> sont stockés sur le compte du voyageur et sont utilisables pour l'achat d'un billet d'avion à titre personnel, réduisant partiellement ou annulant le coût de ce billet. La collecte des miles par un passager dépend de plusieurs paramètres : plus la distance de voyage est importante, plus la classe de voyage est élevée (i.e. plus le billet est cher), et plus le passager voyage fréquemment (statut dans le programme de fidélité), plus ses gains en miles sont élevés⁸⁹. Par nature, le mécanisme est d'autant plus favorable aux passagers qui voyagent pour le compte de leur entreprise et ne paient pas le billet générateur de <i>miles</i>. En France, les <i>miles</i> sont considérés comme un avantage personnel, propre au bénéficiaire. Ce n'est pas le cas en Allemagne, où l'employeur a la jouissance des <i>miles</i> accumulés par ses employés. Quoi qu'il en soit, ce mécanisme est très incitateur : à dire d'experts, on peut estimer que 50% du trafic lié à l'usage des miles est de nature opportuniste, c'est-à-dire que le passager n'aurait pas réalisé son voyage s'il n'avait pas disposé de ces <i>miles</i>. Par ailleurs les compagnies aériennes ont développé des accords avec des acteurs tiers comme American Express qui font gagner des <i>miles</i> pour tout achat de la vie courante. D'un point de vue financier, l'accord de ces avantages aux clients fidèles constitue pour une compagnie aérienne une véritable dette d'un point de vue comptable. L'évolution des normes comptables telle que l'IAS19 en Europe (2011) a d'ailleurs augmenté l'importance de cette dette (prise en compte sur la base d'un coût complet du <i>mile</i>, plutôt que son coût marginal). Pour le groupe Air France-KLM, cette "dette" s'élève à 720M€⁹⁰ et à 2,2 Milliards pour Lufthansa. Chaque année, 300M€ sont comptablement consommés. Cela représentait en 2018 plus de 5% du trafic total en passager.km du groupe Air France-KLM⁹¹. L'usage de ces avantages de fidélité engendrerait ainsi pour le seul groupe Air France-KLM l'émission de près de 1 MtCO₂. En ne retenant que la part du trafic opportuniste (50% voir plus haut), cet impact est de l'ordre de 0,5 MtCO₂. Il importe de préciser que ce système de fidélité n'est pas appliqué dans les compagnies dites « low cost ».	

⁸⁸ Ce type de programme a vu le jour en 1979 aux États-Unis avec la compagnie Texas International Airlines.

⁸⁹ Toutes les compagnies historiques ou presque ont un programmes de fidélité. Voir par exemple le [programme Flying Blue d'Air France KLM](#).

⁹⁰ Voir Rapport annuel d'Air France KLM.

⁹¹ Voir « Miles ahead: How to improve airline customer-loyalty programs ? », Mc Kinsey (2018)

Description détaillée de la contrepartie

L'impact incrémental important des programmes de fidélité des compagnies aériennes sur le trafic aérien et, au-delà, les émissions de CO₂ engendrées, appelle à une réforme profonde de ces outils. Très récemment le *Committee on Climate Change* (CCC) a tout bonnement proposé au gouvernement britannique de supprimer règlementairement ces programmes de fidélité⁹².

Il pourrait être ainsi envisageable de :

- Interdire la collecte de *miles* dans le cadre d'un voyage réalisé à titre professionnel ou interdire l'usage à titre personnel des *miles* accumulés dans des voyages professionnels en s'inspirant de l'exemple allemand;
- Aligner le calcul d'attribution des *miles* sur le barème des gains réalisé pour un voyage en classe économique ;
- Proposer systématiquement aux voyageurs de ne pas recevoir leurs *miles* et de les convertir soit en compensation carbone, soit en dons pour des ONG ;
- 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 CO₂ du stock de *miles* et tous les billets *miles* à venir.

A plus long terme, la suspension complète des programmes de fidélités par *miles* est souhaitable.

Impact CO₂

Le calcul précis du gisement exploitable est difficile compte tenu de l'indisponibilité de statistiques publiques. L'établissement d'un ordre de grandeur à partir du cas du groupe Air France-KLM, dont les émissions de CO₂ liées au trafic aérien est de l'ordre de 19 MtCO₂, est toutefois possible.

En considérant que 5% du trafic du groupe Air France-KLM est généré par usage des *miles*, l'empreinte carbone de ce trafic correspond à 5% de l'empreinte carbone du trafic de la compagnie soit près de 1 MtCO₂.

En ne retenant que la part du trafic opportuniste (50%), le gisement exploitable est de 0,5 MtCO₂.

On estime que l'application des mesures précédentes pourrait entraîner une réduction de 85% de l'usage opportuniste (cf. note de calcul), soit une réduction des émissions de l'ordre de **0,4 MtCO₂** d'ici 2025

Les effets pourraient être relativement immédiats.

Externalités engendrées

Impact emploi

L'application des mesures proposées engendrera une réduction du trafic de l'ordre de 2,5%, et pourrait avoir un impact sur l'emploi du même ordre.

Impact pour les compagnies aériennes

L'application de ces mesures pourrait affecter l'attractivité des compagnies aériennes, et d'autant plus sans accord international. Quand bien même ces réformes seraient menées au niveau mondial, alors les « bénéficiaires indirects » seront les compagnies qui n'offrent pas de programme de fidélité (*low costs* en

⁹² Voir "[Behaviour change, public engagement and Net Zero](#)" Imperial College for the CCC (2019).

général). Par ailleurs, les compagnies les plus performantes en matière de programme de fidélité seront davantage touchées.

Ces aspects sont à relativiser devant la **réduction du niveau d'endettement des compagnies aériennes**, notamment dans le cadre de l'évolution des normes comptables sur les programmes de fidélité (cf. plus haut).

4.3.4 Imposer la décroissance de la consommation moyenne de carburant pour tous les vols touchant la France

Contrepartie sobriété n°4 : Imposer la décroissance de la consommation moyenne de carburant pour tous les vols touchant le territoire français.	
Acteurs concernés par la mesure	Compagnies aériennes ; acteurs industrie aéronautique
Éléments de contexte	
Pour réduire la consommation moyenne de carburant, plusieurs leviers sont mobilisables : 1. Le renouvellement accéléré des flottes par les avions les plus récents ; 2. La densification des cabines : diminution du ratio de classes luxueuses, voire recours à des classes économiques densifiées ; 3. L'augmentation des taux de remplissage ; 4. La diminution des flux de passagers. <u>Levier n°1 : Renouvellement accéléré des flottes par les avions les plus récents</u> Le renouvellement des appareils composant la flotte d'une compagnie aérienne est un processus régulier et vertueux en matière de consommation de carburant (voir partie 2.1 p7). Puisque la fabrication d'un avion ne représente qu'une partie très faible des émissions de CO₂ sur l'ensemble son cycle de vie (de l'ordre du pourcent), il est avantageux, du point de vue du climat, de remplacer les appareils dès qu'une version plus récente et moins consommatrice de carburant est disponible. Aujourd'hui, l'âge moyen des appareils d'une flotte est variable d'une compagnie aérienne à l'autre. À titre d'exemple – d'autres sont possibles – les appareils de la flotte d'Air France ont ainsi un âge moyen de l'ordre de 14 ans^{93 94}. Il existe donc des marges d'amélioration très significatives, en remplaçant une majorité d'appareils par des versions plus récentes et efficaces. Ainsi les appareils des gammes A320 et A330 peuvent être remplacés par leurs successeurs « Neo » (new engine option) ; des A350-900 ou -1000 peuvent venir remplacer les plus gros porteurs, etc. <u>Levier n°2 : Densification des cabines</u> Les sièges des cabines « Business » et « First » occupent une place très significativement plus importante, et sont en outre significativement plus lourds, que les sièges de la classe dite « Economy ». En appliquant un raisonnement marginal, il vient que la consommation par passager de classe affaires est 3 à 5 fois plus élevée qu'en classe économique (voir partie 1.4, p6). D'un point de vue opérationnel, le réaménagement des cabines est une opération régulière bien connue des compagnies aériennes. La durée de vie des sièges est de l'ordre de 7 à 8 ans. Il est donc techniquement envisageable d'amorcer une évolution à la densification des cabines avec l'installation des prochains ensembles de sièges (<i>shipsets</i>) devant être remplacés ou ceux des avions en commande. Il convient également de préciser que les progrès techniques accomplis permettent désormais de remplacer un certain nombre de rangs de sièges classe « affaires » par des rangs de sièges classe « économique » (<i>shipsets</i> « <i>quick changes</i> ») en peu de temps (en moins d'un mois d'immobilisation avion).	

⁹³ L'objectif affiché avant la crise du COVID-19, était de descendre cette moyenne à 10 ans en 2030. Voir le dossier de presse Horizon 2030.

⁹⁴ L'âge moyen des compagnies européennes similaires est de l'ordre de 11 ans, celui des compagnies du Golf sont relativement bas, de l'ordre de 6 ans, à l'instar des compagnies asiatiques. Voir <https://www.airfleets.fr/ageflotte/Air%20France.htm>

Ainsi, à trafic constant (en passager.km), réduire le nombre de sièges des classes affaires et first, et les remplacer par des sièges de classe économique, permettrait de réduire la consommation de carburant par passager et par km parcouru⁹⁵.

Levier n° 3 : Augmentation tendancielle du taux de remplissage des cabines

Le taux de remplissage des cabines est un paramètre important. Moins la cabine d'un avion est « remplie » et plus la consommation de carburant par passager et par kilomètre est importante.

En moyenne, les taux de remplissage des avions sont de plus en plus élevés, et atteignent dans le cas d'Air France 83% pour le court et moyen-courrier, et 87,9% pour le long-courrier, pour l'année 2019⁹⁶. Cependant, selon plusieurs experts, les modèles utilisés par les compagnies aériennes maximisent le bénéfice plutôt que le remplissage.

Tout comme la densification des cabines, augmenter le taux de remplissage des cabines à trafic constant contribue à l'amélioration de l'efficacité énergétique par passager.

Levier n°4 : Réduction du nombre de passagers au départ ou à destination du territoire français

Mécaniquement, l'activation de ce levier réduit la consommation de carburant. Le fait est qu'une fois que le gisement de réduction des émissions de CO₂ associé aux autres leviers aura été exploité, il n'existera pas d'autre moyen pour réduire la consommation de carburant du trafic aérien.

Description détaillée de la contrepartie

Étant donné le caractère très concurrentiel de l'industrie, il semble préférable de ne pas fixer d'objectif par levier. C'est donc une mesure générale et technologiquement neutre qui est proposée, afin de laisser à chaque compagnie l'opportunité de s'adapter au mieux.

La décroissance de la consommation moyenne de carburant pour tous les vols touchant le territoire français pourrait être réalisée par l'instauration d'un **mécanisme réglementaire de type « plafonnement et échange »** avec un objectif de consommation se resserrant d'année en année.

Un tel mécanisme a vocation à être conçu en concertation avec les acteurs du secteur. Toutefois, afin de respecter l'objectif de réduction, la nature des mesures de pénalités appliquées en cas de non-respect des objectifs par l'ensemble des acteurs, ne devra pas être de nature financière, mais bien de nature « physique ».

Le taux de réduction annuel de la consommation de carburant pourra être défini de manière à atteindre une réduction des émissions de CO₂ de 5%/an.

Impact CO₂⁹⁷

Les éléments qui suivent visent à évaluer le gisement de réduction des émissions de chaque levier évoqué ci-dessus.

Levier n°1 : Renouvellement accéléré des flottes par les avions les plus récents

⁹⁵ En absorbant une partie de l'augmentation du nombre de passagers sans augmenter le trafic aérien, ou en diminuant le nombre de vols à demande constante.

⁹⁶ Données Air France. Voir <https://www.deplacementspros.com/transport/air-france-klm-traffic-en-progression-en-2019>. Le taux de remplissage, au niveau mondial, est aujourd'hui de 82% en moyenne : <https://www.iata.org/en/iata-repository/pressroom/fact-sheets/fact-sheet---industry-statistics/>. Bien évidemment, un objectif de 100% est rendu illusoire par diverses considérations pratiques (flux de trafic saisonniers, déséquilibrés, etc.).

⁹⁷ Voir Note de calcul pour le détail.

A trafic constant le gisement total associé au renouvellement des flottes est de l'ordre de 10%, soit **2 MtCO₂/an** environ, à mobiliser dans les 5 ans, dans un scénario très volontariste.

Levier n°2 : Densification des cabines

A trafic et à flotte constante (2018) et pour l'ensemble des vols touchant le territoire français, la conversion de l'ensemble des sièges de la classe « affaires » et de la classe « first » en sièges de classe économique permettrait une réduction des émissions de CO₂ de l'ordre de **2,4 MtCO₂/an** total (entre 2021 et 2025).

Si 50% des sièges de ces classes sont maintenus, la réduction des émissions de CO₂ est de l'ordre de **1,3 MtCO₂/an** au total (entre 2021 et 2025).

Levier n°3 : Augmentation du taux de remplissage des cabines

A trafic et à flotte constante (2018), un taux de remplissage supérieur de 3% sur les vols long courrier permettrait d'éviter **0,3 MtCO₂/an**.

Externalités engendrées

Levier n°1 : Renouvellement accéléré des flottes par les avions les plus récents

L'activation de ce levier implique un surcroît d'investissements regroupés sur une période plus courte pour les compagnies aériennes. En ordre de grandeur, les coûts d'acquisition sont multipliés par 2,5 (par exemple pour Air France, achat de 25 avions neuf en moyenne par an au lieu de 10). **Pour l'ensemble de la filière aéronautique, le renouvellement anticipé des flottes a un effet très positif sur la création d'emploi, et amortirait la crise provoquée par le Covid_19.**

Une filière de démantèlement des avions est également à mettre en place, ou du moins à fortement développer. Notamment, le devenir des matériaux composites, de plus en plus utilisés dans l'aviation, est un axe à étudier sérieusement.

Levier n°2 et 3 : Densification des cabines et amélioration du taux de remplissage

La diminution de la classe affaires des compagnies aériennes a un effet négatif sur leur activité. Ces classes de voyage servent de « *Flagship* » pour attirer les entreprises ou particuliers capables de s'offrir de tels services.

La diminution de la capacité des classes affaires et first pourrait conduire :

- Une partie des passagers à voyager davantage en classe économique ;
- Une partie des passagers à ne pas voyager ;
- Une partie (faible) des passagers à voyager via l'aviation d'affaires.

Au-delà de ces aspects « sombres », une telle inflexion appliquée aux flux de passagers en provenance et à destination du territoire français pourrait avoir une incidence positive sur la part de marché des compagnies françaises, qui se « spécialiserait » dans la fourniture de l'offre adaptée à cette contrainte (cabines, remplissage etc.), tandis que les compagnies basées hors de France n'y seraient pas adaptées a priori.

-

4.3.5 Informer et sensibiliser le consommateur à hauteur des enjeux

Contrepartie sobriété n°5 : Informer et sensibiliser le consommateur à hauteur des enjeux	
Acteurs concernés	Les consommateurs, les compagnies aériennes
Éléments de contexte	
La sensibilisation des consommateurs est un véritable enjeu et un véritable levier pour transformer les habitudes et les comportements vers des modes plus vertueux pour le Climat. Le consommateur de service de transport aérien subi tout au long du processus qui le guide jusqu'à la décision finale d'achat un billet d'avion, de nombreuses incitations. Ces incitations sont particulièrement asymétriques pour le cas du transport aérien, dans le sens où l'ensemble des avantages et des inconvénients engendrés par sa décision d'achat ne lui sont pas présentés d'une manière équilibrée. C'est le cas de la publicité pour les voyages nécessitant le recours au transport aérien (pour laquelle d'importants investissements sont réalisés chaque année⁹⁸). Si les données et les études publiques manquent pour mesurer l'impact de ces campagnes sur l'augmentation du trafic aérien, celui-ci n'est en tout état de cause pas nul. Les campagnes publicitaires pour les compagnies aériennes, ou les opérateurs de voyages, promeuvent par nature la baisse des prix des billets d'avion, 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. Toutefois, une telle incitation, quel que soit le support, n'est en aucune façon nuancée ou mis en regard des impacts de l'aviation sur le réchauffement climatique (voir chapitre 1, p4), C'est également le cas lorsque le consommateur souhaite évaluer l'empreinte carbone associées au vol qu'il souhaite réaliser. Actuellement, la réglementation française sur le calcul des émissions de CO₂ de l'aviation intègre bien l'arrêt, mais ne prend pas en compte l'ensemble du forçage radiatif⁹⁹ (notamment NOx et traînées de condensation). Les incertitudes scientifiques les facteurs multiplicatifs à appliquer sont généralement évoqués pour justifier cette situation¹⁰⁰. Toutefois, s'il y a effectivement des incertitudes importantes, il est relativement conservateur de considérer qu'un facteur 2 peut être utilisé¹⁰¹ (voir chapitre 1, p4). Quoi qu'il en soit, la non-prise en compte de ces effets, conduit à sous-estimer systématiquement l'impact du vol en question¹⁰². Enfin, l'information mis à disposition du consommateur sur un site d'opérateurs de voyage ou directement sur celui d'une compagnie aérienne lorsque celui-ci achète sont billets, est très hétérogène. 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 (GES) émise à l'occasion du transport demandé. Limité initialement au CO₂, l'ensemble des gaz à effet de serre sont désormais couverts depuis 2017. La méthodologie de calcul 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	

⁹⁸ Les investissements média en France en 2018, tous médias confondus représentent 14,4 milliards d'euros. Avec 8% de ces investissements, le secteur du tourisme et de la restauration en occupe le 3e rang. Ces investissements profitent principalement aux fournisseurs de publicité sur internet (40%), à la télévision (25%) et à la presse (15%). Voir « BUMP 2018 : Baromètre Unifié du Marché Publicitaire et de la communication en 2018 », Kantar Media (2019)

⁹⁹ C'est aussi le cas de la Commission européenne qui ne prend pas non plus en compte les effets hors CO₂ pour les calculs des quotas d'émissions de CO₂ que doivent payer les compagnies aériennes sur les vols intra-européens.

¹⁰⁰ Article La Tribune, 29/11/2019, [Aviation : la vérité sur les calculateurs de CO2 \(Air France, GoodPlanet, DGAC...\)](#), par Fabrice Gliszczynski.

¹⁰¹ Par exemple, l'ADEME utilise dans sa Base Carbone un facteur 2 entre les émissions de CO₂ et les émissions de CO₂ équivalentes.

¹⁰² [Impact du transport aérien sur le climat : pourquoi il faut refaire les calculs](#) par Aurélien Bigo sur The Conversation

transport (NF EN 16258). Toutefois, en lien avec le paragraphe ci-dessus, cette méthode ne prend pas en compte les effets climatiques hors-CO₂¹⁰³.

Au-delà on peut regretter que l'utilisateur doive se perdre dans les méandres du site internet des opérateurs de voyages ou des compagnies aériennes pour identifier précisément l'information relative à l'empreinte carbone du voyage qu'il souhaite réaliser. Certaines compagnies aériennes n'offrent qu'un détail de calcul limité¹⁰⁴. D'une manière générale, force est de constater que des marges de progrès très significatives en matière d'efficacité de la sensibilisation existent.

Enfin de nombreux opérateurs de voyage ou des compagnies aériennes mentionnent désormais que certains de leurs vols sont intégralement compensés¹⁰⁵. Cette information, au-delà d'être discutable voire fausse, laisse croire au passager que son impact est neutre, ce qui l'induit en erreur.

Le maintien du statut quo sur ces points apparaît contrevenir à la poursuite des objectifs de réduction des émissions de CO₂ poursuivi par la France et à la nécessaire sensibilisation de la population à un tel enjeu.

Description détaillée de la contrepartie

Reformer la méthode de calcul de l'empreinte climatique du transport aérien de telle sorte que celle-ci prennent également en compte les effets hors-CO₂ du transport aérien.

En conséquence, les outils disponibles, notamment le calculateur TARMAAC de la DGAC, devront évoluer pour prendre en compte la nouvelle méthode de calcul. Une telle évolution pourrait également inclure davantage de critères (notamment le modèle d'avion), afin d'encourager les progrès techniques et opérationnels en s'inspirant par exemple du calculateur Atmosfair¹⁰⁶.

Les entreprises soutenues par des aides publiques doivent s'engager à soutenir cette évolution de la réglementation.

Réguler fortement la publicité sur le transport aérien en commençant par imposer l'affichage homogène, lisible et compréhensible de l'impact climatique du transport aérien sur les supports publicitaires et promotionnels en faveur de ce mode de déplacement, ou mettant en scène son utilisation.

La régulation de la publicité n'est pas une mesure exotique pour le secteur de la communication française. Tout n'est pas autorisé en matière de publicité : des réglementations limitent déjà les conditions de diffusion et les contenus de certains messages publicitaires¹⁰⁷.

Appliqué au transport aérien, une telle régulation pourrait commencer à très brève échéance par des modalités similaires à celles régissant la publicité sur l'alcool, puis pourrait se renforcer progressivement, d'ici les 5 prochaines années, par des modalités semblables à celles régissant le tabac.

Renforcer la réglementation sur l'affichage par les prestataires de transports aériens de l'empreinte climatique du transport demandé. Un tel renforcement pourrait notamment inclure :

- Une disponibilité de l'information sur l'empreinte carbone du voyage demandé dès l'obtention des résultats de recherche ;
- Une visibilité du même ordre que le prix et/ou la durée du trajet ;

¹⁰³ Voir <https://www.ecologique-solaire.gouv.fr/information-ges-des-prestations-transport>

¹⁰⁴ C'est le cas de la compagnie Delta airlines, aucune distinction n'est faite entre les cabines, les vols directs / indirects, et les valeurs minimales sont appliquées

¹⁰⁵ Voir par exemple : <https://www.airfrance.fr/FR/fr/common/fag/a-propos-d-air-france/est-il-possible-de-compenser-les-emissions-de-co2-avec-air-france.htm>

¹⁰⁶ Voir https://www.atmosfair.de/en/standards/emissions_calculation/emissions_calculator/

¹⁰⁷ À titre d'exemple, la loi Evin régule l'exposition de l'alcool et du tabac et y accole des messages d'avertissement. Concernant les eaux destinées à la consommation humaine, une circulaire interministérielle du 30 juillet 2010 réglemente également les messages commerciaux. Et concernant les médicaments, toute communication est régulée par le code de la santé publique

- L'inclusion des effets hors CO2 du transport aérien ;
- La mise en contexte de l'information sur l'empreinte carbone du voyage demandé : « *l'empreinte carbone du voyage représente x% de votre budget carbone annuel compatible avec les objectifs de l'Accord de Paris* » ;
- L'affichage avant paiement d'un pop-up de confirmation à l'achat du billet avec un message du similaire à « *Voulez-vous vraiment réserver un vol contribuant au changement climatique à hauteur de x tCO₂eq ?* » ;

plus immédiat (par exemple à côté du prix de la prestation de voyage), ainsi que l'affichage avant paiement (avec obligation de valider la lecture) d'un ou plusieurs moyens de mise en contexte permettant de mettre en perspective l'empreinte climatique indiquée.

Impact CO2

Impact difficile à mesurer.

Externalités engendrées

Ces mesures visent à introduire de la sobriété dans les comportements de voyages des consommateurs. Mécaniquement leur application devraient conduire à ralentir la croissance du trafic et entraîner une limitation de l'activité de certaines compagnies aériennes et acteurs aéroportuaires.

Aucun autres effets significatifs n'a été identifiés.

4.4 Ouvrir des perspective de relance et de diversification

Proposition n°3 : Diversifier les activités des compagnies aériennes et relancer l'industrie aéronautique française.

4.4.1 Diversifier les activités d'Air France en en faisant un nouvel opérateur ferroviaire

Les compagnies aériennes et les services aéroportuaires représentent près de 100 000 emplois en France¹⁰⁸. Leur volume est en première approximation proportionnel au trafic aérien, lui-même presque proportionnel à la consommation de carburant. La reconversion d'une part de ces emplois est donc incontournable, et une politique d'emploi ambitieuse doit s'efforcer de diriger la production et la consommation vers des produits et services moins intenses en énergie, en carbone et en importations, et donc plus intenses en emplois, que le transport aérien. On propose ici une mesure de diversification « intra-secteur » d'Air France, s'appuyant sur sa culture et son savoir-faire en matière de voyage, de service au passager et de performance industrielle.

NB : Le « plan de transformation de l'économie française » du Shift Project, publié dans sa version finale en septembre 2020, présentera quant à lui le panorama des reconversions des reconversions « inter-secteurs » possibles.

Mesure de relance et de diversification n°1 : Transposer dans la grande vitesse ferroviaire les compétences, et une partie des emplois, d'Air France

Acteurs concernés

Compagnies aériennes (Air France)

Éléments de contexte

L'offre grande vitesse actuelle connaît d'année en année un mouvement de concentration sur les relations les plus massives, et de réduction des fréquences, corrélé à une augmentation rapide de la capacité des rames grande vitesse.

Ainsi, si les premières rames TGV comptaient 350 sièges, les TGV Duplex qui deviennent aujourd'hui la référence comptaient initialement 510 sièges, puis ont été densifiés à 556 sièges, et le « TGV du futur » en cours de développement comptera 600 sièges ! Tout ceci dans le même format d'une rame de 200 mètres de long. La tendance à la densification des sièges (diminution du ratio de 1^{ère} classe) participe de ce mouvement, et trouve son expression la plus marquante dans les trains Ouigo, qui comptent 634 sièges par rame, et pourront à l'avenir compter jusqu'à 740 sièges (« TGV du futur »).

À ce mouvement s'ajoute actuellement une préférence pour la circulation de ces rames en « unité double ». Il en résulte, comme rapporté dans le bilan fourni par l'Autorité de régulation des transports¹⁰⁹, que **l'export moyen d'une circulation TGV intérieure¹¹⁰ atteint en 2018 le chiffre de 684 sièges**, et continue à croître d'une quinzaine de sièges par an. Il s'agit là d'un export que, dans l'aviation, seul l'A380 pouvait atteindre¹¹¹.

Bien sûr, si les compagnies aériennes n'avaient à disposition, pour opérer les lignes intérieures, que des avions gros porteurs, la grande majorité de ces lignes devraient fermer, et il ne subsisterait que quelques vols par jour, sur les liaisons principales seulement.

C'est précisément la situation que connaît le train à grande vitesse, qui n'exploite pas, aujourd'hui, toutes les possibilités du réseau ferré. Malgré les ouvertures de LGV nouvelles, l'offre inter-secteur (c'est-à-dire

¹⁰⁸ <https://www.fnam.fr/qui-sommes-nous->

¹⁰⁹ https://www.autorite-transport.fr/wp-content/uploads/2019/08/bilan-marche-ferroviaire-voyageurs-2018-vol1_vf.pdf

¹¹⁰ Par opposition aux TGV internationaux.

¹¹¹ Cette comparaison doit néanmoins être légèrement tempérée : les arrêts successifs d'un train peuvent permettre d'y rassembler plusieurs origines-destinations ; et un remplissage incomplet fait sens en train, en-dehors des heures de pointe.

transversale) décroît¹¹². Les trains inter secteurs subsistants sont pénalisés par de faibles fréquences, et par la multiplication des arrêts nécessaires au remplissage de trains capacitaires¹¹³. À titre d'exemples :

- alors que le réseau permettrait de réaliser des trajets Rennes-Lyon en moins de 3h30, avec un arrêt à Massy-Palaiseau¹¹⁴, seuls 3 trains par jour sont proposés¹¹⁵, avec des temps de parcours toujours augmentés de 20 minutes par un arrêt intermédiaire hors ligne à grande vitesse,
- Bordeaux-Lille peut fournir un exemple semblable, avec 2 trains par jour et jusqu'à 5h de temps de parcours, alors que l'infrastructure permettrait des temps de l'ordre de 3h35,
- la section de la LGV Paris-Marseille contournant Lyon n'est empruntée que par les TGV en provenance et à destination de Paris, et la totalité des TGV inter secteurs desservent le centre de Lyon, soit un détour de 30 minutes sur des relations comme Marseille-Strasbourg ou Montpellier-Lille.

Les relations radiales, quoique maintenues, ne sont pas épargnées : elles voient de manière générale leur fréquence de desserte baisser¹¹⁶, menant au paradoxe d'une baisse très significative du trafic observé sur les lignes à grande vitesse¹¹⁷, alors qu'elles ont presque toutes été prolongées récemment !

À l'inverse, parce que les voyageurs professionnels font partie de ses clients privilégiés, le transport aérien a une culture forte de l'exploitation de lignes à fréquence étoffée, et des petits modules qui peuvent s'avérer nécessaires pour cela.

Description détaillée de la mesure et définition de l'investissement

La présente contrepartie propose que le soutien public apporté à Air France soit investi pour partie dans un parc de **rames à grande vitesse de capacité modérée**, et serve ainsi à développer des **liaisons « fines »**, principalement inter-secteurs mais aussi radiales, complémentaires de l'offre de grande vitesse ferroviaire existante.

En plus des relations point-à-point qu'elles serviront, ces liaisons **contribueront à alimenter le hub de Roissy¹¹⁸**, avec les fréquences et le niveau de service qui convient, en termes notamment d'accompagnement du passager et de prise en charge des bagages.

Air France pourra déployer, dans le service offert dans ces rames, son savoir-faire au service du passager et de l'expérience de voyage.

Les emplois associés permettront aux salariés d'Air France qui, notamment par quête de sens, le souhaitent, d'effectuer une transition vers le ferroviaire, que ce soit dans les métiers du service au passager, de la maintenance des rames, de la stratégie commerciale...

La capacité exacte des trains sera à fixer précisément en fonction de la possibilité, à révéler à travers le processus d'appel d'offres, de diminuer cette capacité unitaire sans faire trop augmenter le coût par siège. Pour fixer les idées, on peut anticiper des rames de **350 sièges tout au plus**.

L'acquisition de 50 rames¹¹⁹, correspondant à une offre d'environ 25 millions de kilomètres par an, représenterait **un investissement de l'ordre de 1,3 milliards d'euros**. L'investissement comprendrait

¹¹² <http://transportrail.canalblog.com/archives/2018/07/24/36541349.html>

¹¹³ C'est-à-dire que l'objectif de remplir des trains capacitaires conduit à regrouper plusieurs circulations distinctes en une seule.

¹¹⁴ Au sud de l'Île-de-France. Cet arrêt permet d'ailleurs, par « *yield management* », de compléter le remplissage du train par des voyageurs au départ et à destination de l'Île-de-France.

¹¹⁵ Le dernier à 15h40 !

¹¹⁶ Et parfois les temps de trajets augmentent : ainsi la majorité des liaisons Paris – Côte d'azur desservent désormais la gare de Marseille-Saint-Charles, en « rebroussement » (demi-tour, consommateur de temps), toujours pour mutualiser des trains.

¹¹⁷ <http://transportrail.canalblog.com/pages/il%2Dy%2Da%2Dde%2Dla%2Dplace%2Dsur%2Dnos%2Dlqv%2D%2D/37269965.html>

¹¹⁸ Y compris depuis Bruxelles, trajet qui subit aujourd'hui, outre l'allongement de temps de parcours dû au détour par Lille, des creux de desserte de 3 à 4 heures.

¹¹⁹ Ce qui se trouve correspondre à l'investissement réalisé en deux fois par l'opérateur italien NTV (Italo).

également un centre de maintenance, dont le positionnement idéal pourrait être à proximité de Lyon, ou encore à proximité de Lille.

Une décision en sortie de crise Covid-19 permettrait une **entrée en service en 2024-2025**.

Ce niveau d'investissement permettrait d'ajouter +25 à +30% à l'offre grande vitesse actuelle, en termes de trains.km, mais seulement +15%¹²⁰, en termes de sièges.km, ce qui assure de ne pas remettre en cause les équilibres existants.

L'offre ajoutée en sièges.km coïncide aussi approximativement¹²¹ avec le volume des trajets intérieurs que *The Shift Project* propose de renvoyer de l'avion vers le rail (mais il ne s'agit pas des mêmes trajets, dans la majorité des cas).

Pour permettre que la pertinence économique d'une telle flotte se manifeste, une refonte des péages d'infrastructure doit accompagner la mesure. En effet, les péages actuels, élevés pour permettre une péréquation vers le réseau ferroviaire classique, s'appliquant par train, sans considération de l'emport ou des revenus générés par chaque train. Une modification de leur mode de calcul est donc indispensable, sans que cela ne remette en cause le financement du réseau, puisque le trafic de passagers aura été augmenté.

Enfin, la capacité du réseau à accueillir les circulations nouvelles est démontrée par le fait que le trafic était significativement plus élevé il y a une décennie, constat que vient compléter notamment le projet porté par SNCF Réseau d'augmenter les performances de la signalisation de la ligne à grande vitesse Paris-Lyon.

4.4.2 *La réflexion lucide sur la sobriété est aussi porteuse d'une stratégie plus sûre pour l'industrie aéronautique française*

La filière aéronautique regroupe de 200 000 à 350 000 emplois¹²² (avionneurs, motoristes, sous-traitants, activités de recherche et d'enseignement associées). Il s'agit d'une industrie stratégique, fortement contributrice aux exportations françaises, avec environ 35 milliards d'euros d'exportations nettes chaque année¹²³. La France détient en effet une part de marché de 8% de l'industrie¹²⁴, et de 16% des exportations aéronautiques mondiales¹²⁵.

L'enjeu pour cette industrie est de passer d'un mode d'activité reposant principalement sur la croissance du trafic, à un mode reposant essentiellement sur l'optimisation de la performance énergétique des appareils, pour consommer le moins possible, dans le cadre d'un trafic mondial stabilisé, voire en baisse. Pour basculer, il faudra que les compagnies aériennes aient une incitation forte à remplacer leurs avions antérieurs, et que l'industrie soit convaincue que développer les programmes correspondants ne représente pas un risque industriel excessif. Ces conditions ne sont pas réunies aujourd'hui. Ceci doit inciter, d'une part, à porter des politiques volontaristes incitant fortement à l'efficacité énergétique, pour enclencher dès maintenant ce processus au niveau mondial ; et d'autre part à développer dès maintenant, avec la garantie de l'État, un programme de développement d'avion poussant aussi loin que possible l'efficacité énergétique.

Mesure de relance et de diversification n°2 : Lancer, soutenir et accompagner un programme de développement aéronautique visant à initier la production d'ici 2030 d'un avion adapté aux nouveaux besoins de mobilité aérienne, aux nouvelles exigences en matière de consommation d'énergie, et aux nouvelles conditions de vol dans un contexte de changement climatique.

¹²⁰ Ou un peu moins, en comptant les TGV internationaux.

¹²¹ En tenant compte, pour le train, d'un taux de remplissage de l'ordre de 65%.

¹²² Le Groupement français des industries aéronautiques et spatiales (GIFAS) indique ainsi représenter de 195 000 à 350 000 emplois en France, en tenant compte de toute la filière. Voir https://www.gifas.asso.fr/sites/default/files/video/situationemploi2018web_copy1.pdf

¹²³ <https://www.gifas.asso.fr/sites/default/files/video/gifasra20172018agregatsfr.pdf>

¹²⁴ https://aerodynamicadvisory.com/wp-content/uploads/2018/07/AeroDynamic-Teal_Global-Aerospace-Industry_16July2018.pdf

¹²⁵ <http://www.worldstopexports.com/aerospace-exports-by-country/>

Acteurs concernés	Acteurs de l'industrie aéronautique
Éléments de contexte	
Même dans une perspective d'une réduction du trafic aérien, de nombreux avions continueront de voler. Il convient donc d'étudier les voies pour les rendre aussi efficaces, énergétiquement et climatiquement, que possible. La mise en œuvre d'un nouveau et ambitieux programme de développement aéronautique, orienté résolument vers ces objectifs, 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. De tels programmes 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 soit à la hauteur. On peut considérer que 10 ans sont nécessaires pour développer un nouveau programme, certifier l'avion et sortir le premier modèle des chaînes d'assemblage. Le défi est immense. Pour respecter l'objectif de réduction des émissions de 5%/an (i.e. diviser par 4,5 les émissions de CO₂ entre 2020 et 2050), le futur avion devra s'adapter à des contraintes importantes : - La diminution de l'impact climatique total par passager.km : réduction de la consommation de carburant (efficacité énergétique) et réduction des effets hors-CO₂ (effets des oxydes d'azote sur la chimie atmosphérique, traînées de condensation, etc.) 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 : la décroissance nécessaire du trafic aérien va s'accompagner de changement dans les habitudes de voyages de toute distance. - 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 remonter¹²⁶; 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.	
Description détaillée de la mesure	
Lancer, soutenir (afin d'en limiter les risques pour les industriels) et accompagner un programme de développement aéronautique visant à initier la production d'ici 2030 d'un avion adapté aux nouveaux besoins de mobilité aérienne, aux nouvelles exigences en matière de consommation d'énergie, et aux nouvelles conditions de vol dans un contexte de changement climatique. Ce programme de développement devra être fondé sur un cahier des charges adressé aux industriels de l'aéronautique, regroupés en consortium, et dont les éléments essentiels sont décrits ci-dessous : Le cahier des charges vise à répondre aux objectifs suivants : - <u>Date de mise en service</u> : 2030	

¹²⁶ Williams, P. Increased Light, Moderate, and Severe Clear-Air Turbulence in Response to Climate Change, ADVANCES IN ATMOSPHERIC SCIENCES, VOL. 34, 2017, pp. 576–586

- Besoin de mobilité : l'opération du futur avion interviendra dans un contexte de diminution du trafic aérien de 2,5%/an entre 2019 et 2050.
- Consommation et impact climatique : le nouvel appareil devra permettre une réduction de la consommation de carburant (efficacité énergétique) et des effets hors-CO₂ (effets des oxydes d'azote sur la chimie atmosphérique, traînées de condensation, etc.) de **25% par rapport au meilleur standard du marché en 2020** (A320Neo). Cela concerne les phases de vols, comme les phases au sol¹²⁷.
- Catégorie de l'appareil : moyens et longs-courriers.

Les vols de plus de 1500 km sont responsables d'environ 80% des émissions du transport aérien¹²⁸ et constituent le gisement principal à exploiter. Par ailleurs, le trafic international (entre pays) représente environ 40% des passagers dans le monde. Un grand nombre de vols court-courriers sont enfin substituables par les modes de transport terrestres (notamment ferroviaires).

- Eco-conception : la production de ce nouvel appareil doit :
 - permettre d'assurer un renouvellement rapide des flottes des compagnies aériennes dès 2030 ;
 - ne pas engendrer davantage d'émissions CO₂ que les meilleurs standard du marché en 2020 ;
 - être facilement recyclable.

Répondre à ces objectifs ambitieux implique également de :

- Pratiquer la co-conception 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 ;
- 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.

Remarques :

1. *Le développement de cet appareil (avion 2030) permet de d'atteindre les objectifs de réduction de consommation d'énergie pour la période 2030-2040. Pour atteindre l'objectif final (division par 5 des émissions de CO₂ en 2050), il est nécessaire qu'à l'issue de ce 1^{er} programme de développement, un nouveau programme de développement aéronautique soit lancé pour développer l'avion adapté aux conditions de voyage de 2040 (avion 2040). En d'autres termes, l'avion 2030 sera progressivement remplacé par l'avion 2040 (à partir de 2040) et ne volera plus en 2050.*
2. *Les gains réalisables par le biais des agro-carburants ne sont pas considérés, notamment parce que des questions d'allocation de la ressource entre différents secteurs se posent et sur lesquels il*

¹²⁷ Les calculs de dimensionnement sont présentés en Annexe.

¹²⁸ Aviation benefits beyond borders, Report, Air Transport Action Group (ATAG), Octobre 2018

est difficile de statuer sans une réflexion systémique. La capacité des moteurs à les utiliser pourrait être une contrainte à ajouter au cahier des charges.

3. *Une capacité de connexion aux grand hubs des autres continents pourra être considérée, dans le cadre d'une version « long range ».*
4. *En complément, le transport de fret pourrait bénéficier du développement des dirigeables, ce qui nécessite encore des études en recherche et développement. Une filière existe déjà en France pour le développement de dirigeables de 60 tonnes.*

Externalités engendrées

A titre indicatif, le coût d'un programme de développement d'un nouvel avion (ex. A380) est d'environ 10 milliards d'euros.

Sur la base des budgets de recherche stratégique *Clean Sky*, le financement nécessaire pour la réalisation des études concernant la mise en place d'un programme court et moyen-courrier est de l'ordre de 150 millions d'euros par an, ce qui représente quelques milliers d'emplois directs à forte valeur ajoutée (recherche et développement) par an. La continuité de ce financement sur 5 ans permettrait d'accompagner la mise en place du programme et la levée des risques technologiques rencontrés par les industriels¹²⁹.

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).

¹²⁹ [Clean sky 2 joint undertaking third amended bi-annual work plan and BUDGET 2018-2019](#) page 96/97

5 Conclusion

Le transport aérien fait partie des quelques secteurs pour lesquels il n'existe pas, à court ni moyen terme, d'alternative technologique « décarbonée » (à la différence du transport automobile par exemple). Cette caractéristique fait de ce secteur une victime de l'inéluctable transition vers une économie bas-carbone. De nombreux emplois, de nombreux territoires et entreprises seront affectés tôt ou tard. Repousser l'échéance ne ferait qu'aggraver le choc. Cette situation démontre le besoin inéluctable d'une stratégie nationale claire et ambitieuse pour transformer profondément ces activités avant qu'elles ne subissent durement les effets des contraintes physiques.

Cette étude en dessine les voies possibles et sincères. Même conçue avec la plus grande attention aux emplois, cette transformation n'en maintiendra pas le nombre au sein du secteur du transport aérien. Ceci confirme la nécessité d'une stratégie prévoyant des mouvements de salariés entre secteurs, et le développement résolu des secteurs fortement décarbonables. Une telle stratégie est justement l'objet du « plan de transformation de l'économie française » du *Shift Project*, publié dans sa version finale en septembre 2020.

6 Annexe : Précisions sur les opérations au sol

La mise en œuvre du SETO, SETO ou l'usage de système de traction engendrent des contraintes opérationnelles récapitulées dans le tableau ci-dessous.

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 2 ^{ème} moteur, mais aussi une génératrice en back-up de la génératrice moteur. Cela réduit le bénéfice en consommation fuel, 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 l'allumer 5 min avant le décollage (à affiner selon les moteurs) : • 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. • 3min de préchauffage moteur. • 1min pour faire la checklist avant décollage. 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	

Elles engendrent aussi des risques et externalités négatives (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
Impact sur la durée de vie des moteurs car le fait de passer le moteur de éteint (froid) à plein gaz (très chaud) directement est pénalisant en durée de vie, et donc nécessitera davantage de maintenance sur les moteurs.		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), une problématique d'usure des freins prématurée existe. Surtout après l'atterrissage, où l'avion est plus léger, et d'autant plus que l'avion a déjà chauffé les freins lors de l'atterrissage. Le SETI-SETO et STAR permettent d'y remédier.

Contributeurs et remerciements

Cette synthèse et ce rapport sont le résultat d'un travail collectif, qui a bénéficié de nombreuses contributions d'experts, particulièrement de *Shifters*, et de membres de SUPAERO-DECARBO, un collectif d'actuels et anciens élèves de l'ISAE SUPAERO. Le contenu de ce document n'engage que *The Shift Project*. Les interprétations, positions et recommandations y figurant ne peuvent être attribuées aux relecteurs ou contributeurs.

SUPAERO-DECARBO

SUPAERO-DECARBO est un collectif d'actuels et anciens élèves de l'ISAE SUPAERO qui pense que la nouvelle donne climatique et planétaire invite urgemment l'humanité à entrer dans un changement sans précédent pour lequel la contribution de chacun sera déterminante. En outre, elle ouvre un champ d'innovation et d'usage, lucide inédit et enthousiasmant, dans lequel les ingénieurs ont un rôle central à jouer. 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. Leur action est dédiée en premier lieu aux étudiants et à la communauté de l'ISAE-SUPAERO, mais s'adresse plus largement à tous ceux qui veulent contribuer avec cœur et détermination à la mobilité et à la société de demain.

The Shifters

The Shifters, c'est un réseau de plusieurs milliers de bénévoles dont la mission est : d'appuyer le *Shift* dans ses travaux, de s'informer, débattre et se former sur l'économie, l'énergie et le climat, et diffuser les idées et travaux du *Shift*.

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. Nos membres sont de grandes entreprises qui veulent faire de la transition énergétique leur priorité.

La place des « Contreparties » dans le « Plan de transformation de l'économie » du Shift

Le 6 mai 2020, le *Shift* a publié son [programme de travail d'urgence](#) détaillant le chantier à mener pour aboutir à un « Plan de transformation de l'économie française », et la [campagne de financement participatif](#) associée. Nous remercions vivement les donatrices et donateurs pour leur votre engagement en faveur du « chantier d'urgence ».

Le « Plan », dont une première version sera publiée à l'été, visera à rendre saines et robustes nos activités essentielles (se nourrir, se loger, se déplacer, se soigner, travailler, comprendre, échanger) pour les temps de crise économique et écologique.

Il est accompagné de « contreparties décarbonantes » aux aides de l'État dans le cadre de la crise du COVID-19, détaillées par filière, par territoire ou par acteur. Des contreparties destinées en premier lieu aux gens qui maîtrisent des savoir-faire puissants, mais travaillent dans des activités risquant a priori d'avoir beaucoup à perdre, telles que l'aéronautique et l'automobile.

Contact

preparerlavenir@theshiftproject.org | Presse : 06 95 10 81 91

theshiftproject.org



Avec la contribution de :

