

Climat : pouvons-nous (encore) prendre l'avion ?



**Analyse et modélisation de l'impact climatique du transport aérien
actuel et à venir en France**



Juillet 2020

Auteurs : Charles Adrien LOUIS, César BOUVET, Guillaume MARTIN, Sylvain BOUCHERAND - BL évolution

Résumé

Le secteur aérien profite aujourd'hui d'une relative méconnaissance de son impact sur le climat. Celui-ci est souvent réduit au seul kérosène brûlé lors des phases de vol alors que d'autres phénomènes tout aussi importants ne sont pas pris en compte. Les traînées de condensation et les cirrus qui se forment après le passage d'un avion par exemple réchauffent le climat autant que le CO₂ émis en vol mais ne figurent nulle part dans l'empreinte écologique du secteur aérien. De ce fait, **le transport aérien est plus vraisemblablement responsable de 7,3% de l'empreinte carbone de la France et est en augmentation**, tiré par une forte croissance du nombre de passagers. Les projections du trafic aérien s'avèrent difficilement compatibles avec les engagements internationaux en matière climatique.

Pour modéliser différents scénarios d'impact climatique de l'aviation civile dans les décennies à venir, nous avons disséqué les facteurs explicatifs de ces émissions et les évolutions potentielles du secteur pour, dans un second temps, les faire varier au regard des évolutions possibles (maximum et minimum théoriques, évolutions tendanciennes...).

Nous avons tenté d'explorer toutes les pistes permettant de diminuer les émissions du secteur prenant en compte à la fois les évolutions du nombre de passagers, de l'emport moyen par avion, de la distance moyenne par vol, de l'efficacité énergétique des appareils (gestion des roulages, motorisation, aérodynamisme...) ainsi que les changements de carburants possibles (agro-carburants, kérosène de synthèse, hydrogène...) ou encore le développement d'une aviation de rupture et enfin l'utilisation du système de compensation des émissions. Nous avons cherché dans quelle mesure nous pouvions conserver le transport aérien que nous connaissons, tout en respectant l'Accord de Paris.

Il en ressort que sans rupture majeure sur au moins un de ces facteurs, les émissions du secteur aérien continueront de croître alors même que les engagements nationaux et internationaux exigent une réduction drastique des émissions de gaz à effet de serre.

L'intégralité des efforts nécessaires pour aligner la France sur la trajectoire de la neutralité carbone seraient annihilés par le secteur aérien s'il devait continuer de croître. Les émissions du secteur aérien représenteraient l'équivalent du budget carbone de la France établi par la Stratégie Nationale Bas Carbone en 2050. **Manifestement, et même avec une politique très volontariste sur les leviers techniques, le seul moyen crédible de tenir une trajectoire raisonnable d'un point de vue climatique est de diminuer le trafic.**

A moins de subir des chocs majeurs, le transport aérien ne peut plus s'aligner avec une trajectoire compatible avec les 1,5°C, du seul fait des émissions projetées de la flotte d'aéronefs déjà existante.

Pour s'aligner avec l'Accord de Paris et ne pas dépasser 2°C de changement climatique, une diminution du nombre de passagers comprise entre 2,5% et 4% par an est nécessaire. En d'autres termes, **il faudrait réduire de moitié le nombre de passagers annuels d'ici 20 ans maximum.**

Pourtant, l'Etat et le secteur semblent se projeter vers une augmentation continue du trafic aérien au regard des infrastructures aéroportuaires en projet visant à étendre les capacités existantes. Parmi ces nombreux projets, nous avons choisi de nous pencher sur le cas du Terminal 4 de l'aéroport de Roissy – Charles de Gaulle dont la construction devrait s'achever en 2037. Selon nos différents scénarios, la construction de cette nouvelle infrastructure et les scénarios d'augmentation du trafic qui la justifient multiplieraient par un facteur 1,4 à 1,7 les émissions annuelles liées à l'aéroport Roissy – Charles de Gaulle à l'horizon 2037. **Cet aménagement va à l'encontre des impératifs écologiques sur des temporalités où il ne fait aucun doute que les émissions devront largement diminuer.**

Afin d'accompagner la nécessaire décroissance du secteur aérien pour que la transition puisse se faire en prenant en considération l'économie, l'emploi et les besoins de déplacement des individus, le report modal vers le ferroviaire, apparaît comme la meilleure alternative pour les trajets nationaux et européens, en passant notamment par le train de nuit. Pour les voyages longues distances, les dirigeables apparaissent comme une alternative sérieuse d'un point de vue écologique et économique.

Sommaire

Résumé	2
Lexique	5
Glossaire.....	5
Avant-propos.....	6
Synthèse	7
Un secteur à l'impact sur le climat sous-évalué	8
Des tendances peu rassurantes mais incomplètes	9
Pistes de réduction des émissions de GES du secteur aérien	11
Scénarios d'évolution envisagés entre 2030 et 2050	13
Réduire significativement les émissions du secteur aérien relève de la mission impossible	17
Pour rendre compatible l'aviation avec les engagements internationaux, il faut réduire le nombre de passagers	20
Le « Terminal 4 » de Roissy Charles de Gaulle un projet incompatible avec l'atteinte des objectifs en matière de climat	21
Vers des alternatives à l'avion	23
Rapport complet	25
Introduction	26
I. Le secteur aérien en chiffres	27
I.1. Un secteur en forte croissance, mais dont le nombre d'emplois directs diminue	27
I.2. Quelques chiffres clés du secteur aérien	28
I.3. Une part des émissions de gaz à effet de serre nationales en forte croissance	29
I.4. De fortes disparités dans l'accès à l'aviation	30
I.5. La place de l'aviation dans les textes législatifs sur les émissions de GES	31
II. Les émissions de CO2 de l'aviation aujourd'hui, de quoi parle-t-on ?	33
II.1. Qu'est-ce qui entre en jeu dans le calcul des émissions de CO2 de l'aviation ?	33
CO2	33
Traînées de condensation	33
Autres gaz (Ozone O3 ; Méthane CH4).....	34
II.2. Une place à part dans la comptabilité des émissions mondiales	34
III. Les tendances actuelles.....	36
III.1. Un secteur dont la croissance accélère	36
III.2. De multiples paramètres à prendre en compte.....	37
III.3. Pour les 20 prochaines années, le secteur aérien envisage une croissance soutenue.....	39
III.4. Des projections qui ne prennent pas en compte tous les paramètres	39
III.5. L'existence d'un plafond naturel du nombre de déplacements est peu probable	40
III.6. La capacité du secteur à répondre à la demande reste hasardeuse	42
IV. Pistes de réduction des émissions de CO2 de l'aviation.....	43
IV.1. Un choix d'indicateurs qui peut induire en erreur	43
IV.2. Augmenter l'emport moyen	43
IV.3. Le roulage « vert » ou Green Taxiing :	43

IV.4. Optimiser les trajets	44
Optimiser les trajectoires de vol.....	44
Optimiser les destinations de vols.....	45
IV.5. Les limites de l'efficacité bientôt atteintes.....	45
IV.6. Changer le carburant, les nouveaux carburants possibles	46
L'avion électrique	46
Hydrogène	46
Biocarburants	47
Kérosène de synthèse.....	48
IV.7. Compenser les émissions, le système CORSIA.....	48
IV.8. Innovations de rupture.....	50
Vols orbitaux.....	50
Avions supersoniques.....	51
« L'avion connecté et autonome »	51
IV.9. Les dirigeables, comme transport aérien d'avenir	51
V. Scénarios d'évolution envisagés à horizon 2030 et 2050.....	52
Point méthodologique.....	52
Variables utilisées	52
Scénario 1A : Scénario tendanciel 3.7.....	57
Scénario 1B : Scénario tendanciel 1.4.....	60
Scénario 2A : Scénario croissance verte 3.7 :	63
Scénario 2B : Scénario croissance verte 1.4.....	66
Scénario 3 : Scénario effet rebond	69
Scénario 4 : Scénario catastrophe climat.....	72
Scénario 5 : Scénario réaliste.....	75
Pour rendre compatible l'aviation avec les engagements internationaux, il faut réduire le nombre de passagers	79
Scénario 6 : un scénario compatible avec les objectifs nationaux et européens	80
Scénario 7 : tendre vers une trajectoire +1,5°C.....	83
VI. Zoom sur le projet « Terminal 4 » de Roissy - Charles de Gaulle.....	86
VI.1. Quels impacts aurait le projet de Terminal 4 ?.....	87
VI.2. Evolution tendancielle des émissions des vols liés à l'aéroport Roissy - Charles de Gaulle.....	90
VI.3. Scénarios proposés par ADP	91
VI.4. Un progrès tous azimuts ne suffit pas	93
VI.5. Les limites atteintes sans construction du Terminal 4	95
VI.6. Un scénario réaliste, cohérent avec la trajectoire visée par la SNBC	96
VI.7. Un bilan qui n'est pas complet	98
VI.8. L'incohérence de la construction du Terminal 4 au regard des impératifs de réduction des émissions de GES	98
VI.9. Les impacts d'une réduction du trafic intérieur (liaisons domestiques) grâce au développement du trafic ferroviaire sur la fréquentation des aéroports et gares parisiens	99
Quelles estimations pour le coût des infrastructures ?.....	101
Conclusion.....	102
Sources.....	103

Lexique

- **Vol domestique** : vol dont le décollage et l'atterrissage ont lieu sur le territoire national (métropole et outre-mer)
- **Mouvement** : Décollage ou atterrissage d'un avion
- **Emport** : Nombre de passagers dans un avion
- **Liaison radiale** : Liaison interne reliant un aéroport régional à un aéroport parisien (Région-Paris)
- **Liaison transversale** : Liaison interne reliant deux aéroports régionaux (Région – Région)
- **Vol commercial** : Vol comportant des passagers ayant payé leur billet

Glossaire

- **ADP** : Aéroport De Paris
- **CDG** : Charles de Gaulle (Aéroport Roissy - Charles de Gaulle)
- **CORSIA** : Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation
- **IATA** : International Air Transport Association
- **GES** : Gaz à Effet de Serre
- **SESAR** : Single European Sky ATM Research
- **OACI** : Organisation de l'Aviation Civile Internationale
- **TARMAAC** : Traitements et Analyses des Rejets éMis dans l'Atmosphère par l'Aviation Civile
- **TCAC** : taux de croissance annuel composé
- **t CO2e** : tonne équivalent CO2 (quantité de GES correspondant à une tonne de CO2)
- **SNBC** : Stratégie Nationale Bas Carbone

Avant-propos

Il est parfois difficile d'accéder aux données et hypothèses d'études comme celle-ci. Pour certains acteurs, ces données, connaissances et savoirs représentent une mine d'or sur laquelle repose tout ou partie de leur modèle économique. Au contraire, nous sommes convaincus que le rôle d'un cabinet de conseil comme BL évolution n'est pas de produire et de reproduire cette connaissance pour en tirer profit. Nous pensons que l'urgence de la situation climatique nous invite à débattre de manière éclairée et à ouvrir notre propre travail aux regards de toutes et tous, experts comme simples citoyens. Nous espérons, par cette transparence, susciter des remarques constructives, légitimer notre travail en l'ouvrant à une revue par les pairs et permettre à d'autres de poursuivre cette dynamique sur le modèle de l'open source. Ainsi, la présente étude s'accompagne de la publication du modèle de calculs ayant permis de construire les différentes analyses que vous allez lire. Sentez-vous libre de l'utiliser et de faire vos propres scénarios. Si vos conclusions diffèrent des nôtres, nous serions heureux d'en débattre.

A propos de BL évolution

A l'heure où les crises environnementales et sociétales interrogent et bouleversent les modèles économiques et sociaux, BL évolution apporte à ses clients analyses, conseils et méthodes pour accélérer la transition écologique.

Nous croyons à la nécessité d'apporter les meilleurs outils pour équiper les acteurs publics et privés dans leurs stratégies d'adaptation et de transformation. Nous sommes engagés à leurs côtés pour réussir chaque étape et dessiner, avec eux, des perspectives de développement plus écologiques, plus solidaires et donc, plus durables.

En savoir plus : www.bl-evolution.com | contact@bl-evolution.com

Synthèse

Un secteur à l'impact sur le climat sous-évalué

L'inventaire des émissions de GES de la France fait état d'un peu plus de 5 Mt CO₂e pour les émissions liées au transport aérien (ne prenant en compte que les vols intérieurs, Outre-mer compris), laissant croire qu'il s'agit d'un secteur finalement peu impactant au regard de l'ensemble de nos émissions de GES.

Pourtant, selon les estimations TARMAAC, en 2018, les émissions de CO₂e pour le transport aérien en France (en prenant en compte 50% des long-courriers internationaux, les 50% restants étant imputés au pays de destination) s'élèvent à 22,7 millions de tonnes équivalent CO₂ et sont en progression de +3,8% par rapport à 2017 et à 23,2 Mt CO₂e en prenant également en compte l'aviation non commerciale (aviation privée).

S'il s'agit déjà d'un chiffre conséquent, représentant 5% des émissions de GES françaises pour seulement 0,4% des emplois, celles-ci ne prennent en compte que la quantité de kérosène brûlée en vol. Pour faire un bilan complet, il faudrait y ajouter les émissions liées à la production et la distribution du kérosène mais également celles liées aux traînées de condensation.

En sortie de réacteur, en plus des éléments chimiques sous forme gazeuse (principalement CO₂), on retrouve également de la vapeur d'eau ainsi que de petites particules provenant des impuretés du kérosène. Celles-ci, si elles sont émises à une certaine température, vont servir de point de concentration de l'humidité formant ainsi de fines gouttelettes laissées en suspension après le passage de l'avion. Ces accumulations de gouttelettes forment ainsi les longues traînées blanches que l'on peut apercevoir après le passage d'un avion. On estime que ces traînées de condensation ont un pouvoir réchauffant similaire au CO₂ émis pendant le vol. De plus, ces traînées de condensation peuvent induire une nébulosité supplémentaire sous forme de cirrus aux effets réchauffants.

On estime donc qu'en fonction des différentes approches, et de l'exhaustivité du périmètre en termes de GES, le « poids » carbone de l'avion dans les émissions françaises en 2018 varie du simple au décuple :

Approche retenue	Émissions de GES du secteur aérien	Émissions de GES nationales	Poids du secteur aérien
Inventaire national des émissions de GES français (uniquement les vols intérieurs, prise en compte du CO ₂ en vol)	5 Mt CO ₂ e	445 Mt CO ₂ e	1,2%
Inventaire national des émissions de GES français, tous GES confondus	11 Mt CO ₂ e	451 Mt CO ₂ e	2,4%
Inventaire national avec prise en compte de la moitié des vols internationaux, CO ₂ en vol uniquement	22,7 Mt CO ₂ e	463 Mt CO ₂ e	4,9%
Inventaire national avec prise en compte de la moitié des vols internationaux, tous GES	50 Mt CO ₂ e	490 Mt CO ₂ e	10,2%
Inventaire national avec prise en compte de 100% des vols au départ ou à destination de la France, tous GES	88 Mt CO ₂ e	532 Mt CO ₂ e	16,5%
Empreinte carbone de l'aviation, uniquement CO ₂ en vol	25,6 Mt CO ₂ e	749 Mt CO ₂ e	3,4%
Empreinte carbone de l'aviation, tous GES confondus	56,2 Mt CO ₂ e	775 Mt CO ₂ e	7,3%

Ainsi, pour la partie vol uniquement, la part de l'aviation dans nos émissions de GES peut être considérée entre 1,2% et 16,5% de nos émissions.

Dans l'approche empreinte carbone, qui a le mérite de répartir les émissions selon les consommateurs, le secteur aérien représente donc 7,3% de nos émissions¹.

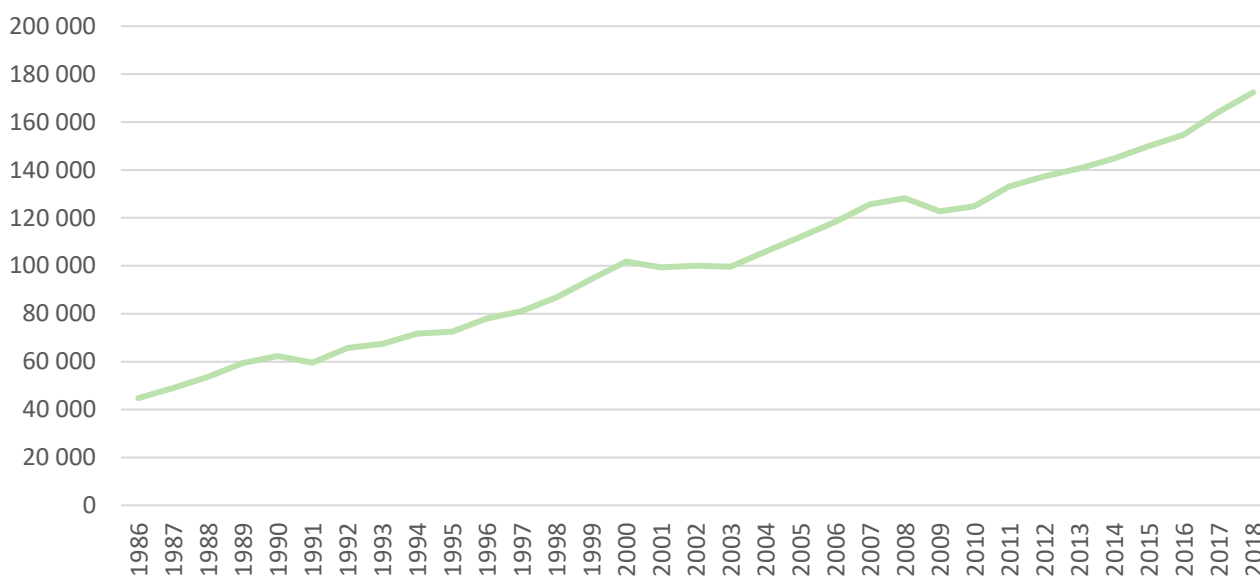
Il est par ailleurs fréquent de caractériser l'impact en termes d'émissions de GES de l'aviation par des données en CO2 par passager kilomètre (120g CO2e en moyenne). Cette mesure a le mérite d'être simple et de pouvoir caractériser assez facilement l'efficacité du secteur aérien pour une unité donnée. Il faut tout de même garder à l'esprit qu'elle occulte généralement les autres émissions de GES et en particulier les traînées de condensation dont le potentiel réchauffant est égal à celui du CO2.

Par ailleurs, cet indicateur peut créer la fausse impression que les émissions baissent à mesure que le nombre de passagers augmente. S'il témoigne de l'efficacité du secteur, il ne peut refléter à lui seul l'impact du transport aérien.

Des tendances peu rassurantes mais incomplètes

L'évolution du nombre de passagers annuels en France suit une augmentation moyenne de 2,7% par an depuis une vingtaine d'années. Cette tendance s'accélère puisqu'entre 2016 et 2018, il y a eu 18 millions de passagers aériens supplémentaires en France, soit une croissance de plus de 10% en 2 ans.

Nombre de passagers aériens en France (en milliers)



Les tendances observées ainsi que les perspectives de développement conduisent différents acteurs du secteur à retenir un scénario de +2,7% d'augmentation du nombre de passagers annuels pour l'aviation civile française.

De manière générale, les projections d'évolution du trafic sont effectuées en prolongeant la règle empirique des années précédentes : lorsque le PIB d'un pays augmente de 1%, la consommation de transport aérien dans ce pays croît également de 1,5 à 2 % selon le niveau de développement du pays.

Or, dans les pays développés, les besoins essentiels sont déjà couverts. Dans ces pays, le temps disponible pour les vacances, la confiance et le portefeuille des consommateurs, le niveau de service et son prix tendent à avoir un impact plus important sur la demande de déplacement aérien. Pour autant, les projections d'évolution du trafic aérien semblent

¹ Donnée certainement sous-évaluée car il est probable qu'il y ait plus de Français qui volent hors de France que d'étrangers qui volent en France. D'une part, parce qu'il y a plus de Français qui partent que d'étrangers qui arrivent et d'autre part, les distances que peut faire un étranger en France sont beaucoup plus faibles que celles que peut faire un Français à l'étranger, aux USA par exemple.

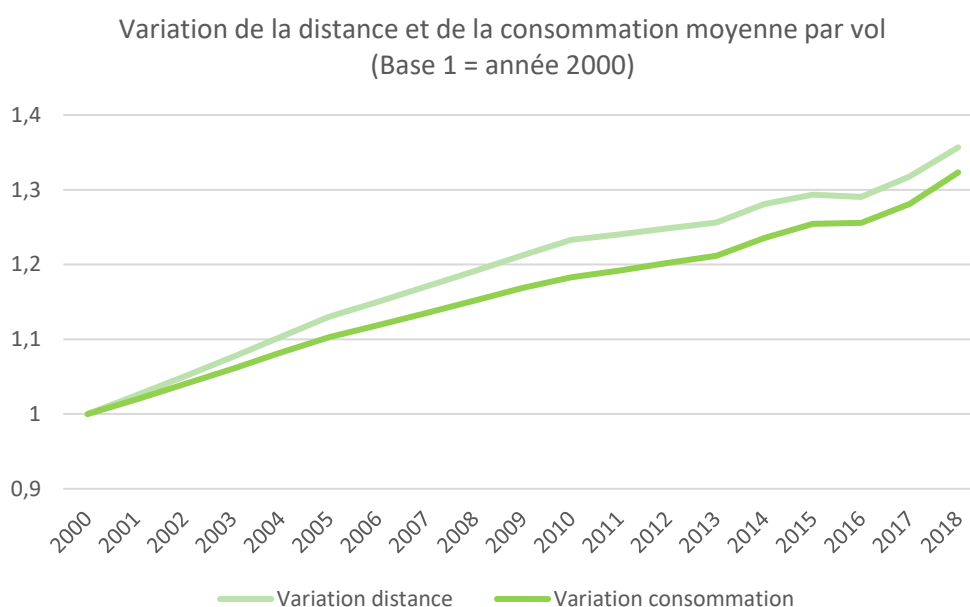
ne pas prendre en compte ces facteurs. Il est donc probable que des facteurs sociaux prennent le pas sur les logiques économiques, ce qui limite la confiance qu'il est possible d'accorder à ces projections. Le phénomène de « Flygskam » (honte de prendre l'avion) ou plus récemment la crise sanitaire peuvent avoir des répercussions de longue durée sur l'évolution du nombre de passagers.

Pour autant, il n'existe pas, a priori, de plafond de verre. En 2018, le nombre de passagers s'élevait en France à 172,4 millions, soit, au regard de la population française (67 millions), 2,57 fois le nombre d'habitants. Or, en Suède cet indicateur est de 4,2 et le nombre de passagers entre 2012 et 2017 a augmenté de 5,9% par an.

Si l'évolution des émissions de GES est moins rapide que le nombre de passagers, c'est essentiellement lié à un emport moyen² en forte augmentation, qui est passé de 95 à 150 passagers équivalent entre 2000 et 2018, soit une augmentation conséquente de 58%.

Au-delà des données liées aux passagers, le nombre de mouvements aériens est un paramètre fondamental qui influe notamment sur le dimensionnement des aéroports. Les variations de l'emport et du nombre de passagers permettent de déterminer les variations du nombre de mouvements.

Parmi les facteurs influençant la consommation de carburant, et donc les émissions de GES d'un vol, le premier déterminant est la variation de la distance. Or, sur les 20 dernières années, la différence de variation entre la distance et la consommation moyenne est très faible. Cette différence de 0,1% par an caractérise le gain d'efficacité réel par vol.



Ainsi, il n'y a pas de tendance naturelle à l'infléchissement des émissions de GES du secteur aérien. Le premier vecteur d'efficacité du secteur aérien est depuis 20 ans l'augmentation de l'emport moyen, jouant notamment sur un faible taux de remplissage au début des années 2000 qui s'est nettement amélioré depuis (passant de 64% à 84%).

² Nombre de passagers par avion



Pistes de réduction des émissions de GES du secteur aérien

Pour se maintenir, voire continuer à se développer, le secteur aérien doit donc trouver de nouveaux leviers de réduction de ces émissions de GES. Le tableau suivant synthétise les principaux avantages et les limites de ces leviers.

Piste de réduction	Avantages	Limites
Augmenter l'emport moyen	<ul style="list-style-type: none">- Nécessite moins d'avions et réduit le nombre de mouvements- Ne requiert dans un premier temps pas de changement de flotte, en augmentant le taux de remplissage des avions	Une augmentation de l'emport entraîne à termes un changement de flotte pour des avions plus gros, plus lourds et beaucoup plus émissifs (qui restent toutefois moins émissifs que deux avions aux emports cumulés équivalent)
Supprimer les classes disposant d'un espace supérieur aux classes économiques	<ul style="list-style-type: none">- Augmenter largement le nombre de places disponibles dans un avion- Cette mesure nécessite des investissements mineurs permettant de conserver la flotte actuelle	Cette action pourrait favoriser un effet rebond vers une aviation privée plus émissive.
Généraliser le roulage « vert »	<ul style="list-style-type: none">- Réduit les émissions aéroportuaires et améliore la qualité de l'air du territoire- Nécessite peu de moyens pour sa mise en place	<ul style="list-style-type: none">- Ne concerne environ que 3% des émissions de GES du secteur- Des contraintes liées à la phase de préparation des réacteurs nécessite de les faire fonctionner avant le décollage, ce qui limite les possibilités d'économie de carburant
Optimiser les trajectoires de vol	<ul style="list-style-type: none">- Permet de réduire les traînées de condensation de l'ordre de 60% si seulement 1,7% des mouvements voient leur trajectoire optimisée	<ul style="list-style-type: none">- Entraîne une légère surconsommation de carburant de l'ordre de 5% pour les vols concernés
Optimiser les destinations de vol	<ul style="list-style-type: none">- Permet d'éviter la multiplication des escales et des « sauts de puces » entre aéroports- Permettrait aux passagers d'effectuer des trajets directs et plus rapides	<ul style="list-style-type: none">- Réorganisation du réseau de lignes aériennes européen extrêmement difficile à impulser
Améliorer l'efficacité énergétique des avions	<ul style="list-style-type: none">- La consommation de carburant serait réduite pour un même vol en changeant simplement les matériaux utilisés pour qu'ils soient plus légers, l'architecture de l'appareil pour qu'il ait une meilleure pénétration dans l'air ou bien le modèle de réacteur pour qu'il soit moins consommateur de carburant	<ul style="list-style-type: none">- L'efficacité énergétique des avions a été largement améliorée ces dernières décennies et la marge de progression restante en matière de progrès technologique semble infime- Certaines technologies comme l'open rotor permettent d'économiser du carburant mais nécessitent de voler moins vite- Lorsqu'une amélioration technologique est découverte, il faut compter des années avant qu'elle soit généralisée à l'ensemble de la flotte. Pour rappel, la durée de vie utile d'un avion est de 18 ans.
L'avion électrique	<ul style="list-style-type: none">- Permettrait d'utiliser de l'électricité issue d'une production décarbonée	<ul style="list-style-type: none">- Les batteries nécessaires alourdissent grandement le poids de l'avion et réduisent donc les distances qui peuvent être parcourues avec une même quantité d'énergie- Cette technologie permet aujourd'hui de transporter 2 personnes pendant 1h à une vitesse très inférieure aux avions de ligne. Cette technologie n'est pas adaptée et ne le

		sera vraisemblablement jamais sur une temporalité raisonnable
Voler à l'hydrogène	<ul style="list-style-type: none"> - N'émet pas de CO2 lors de la combustion en vol - De l'hydrogène « vert », c'est-à-dire qui n'émet pas de CO2, est déjà produit en France. La fabrication d'hydrogène vert est donc une opportunité de création d'emplois. 	<ul style="list-style-type: none"> - L'hydrogène est extrêmement léger, ce qui implique de le stocker dans des espaces jusqu'à 3 fois plus importants pour la même quantité délivrée que du kérosène. Ainsi, il faudrait revoir la flotte pour la rendre à même de transporter suffisamment de carburant, la distribution d'hydrogène dans les aéroports ainsi que son stockage. - Les molécules d'hydrogène étant particulièrement petites, il arrive qu'elles traversent certains matériaux comme l'acier, c'est pourquoi les réservoirs à hydrogène peuvent être jusqu'à 100 fois plus chers que les réservoirs d'autres gaz. - ne permet pas d'éliminer la part du « hors CO2 » imputable au passage d'un avion - La très grande majorité (96%) de l'hydrogène fabriqué aujourd'hui l'est par vaporeformage d'hydrocarbures, un procédé extrêmement émissif puisque pour obtenir une tonne d'hydrogène, 10 à 11 tonnes de CO2 sont produites et en général émises dans l'atmosphère. Ainsi, bien que le CO2 ne soit pas émis dans les phases de vol, il l'est en amont.
Voler aux biocarburants	<ul style="list-style-type: none"> - permet de réduire de 25% les émissions de CO2 en vol (limite de 50% dans le mix de carburant d'un avion et émissions inférieures de moitié au kérosène pour être identifié comme « biocarburant ») ou de 12,5% si on prend en compte les effets « hors CO2 ». - Les carburants dits de 2^{ème} génération permettent de ne pas entrer directement en conflit avec les cultures alimentaires puisqu'ils sont fabriqués à partir de déchets agricoles. 	<ul style="list-style-type: none"> - Le potentiel de réduction des émissions via l'utilisation de biocarburants est relativement faible (12,5%) - Ces biocarburants lubrifient moins et résistent moins aux températures extrêmes, ce qui ne permet pas de les utiliser « purs ». Ils doivent donc être mélangés au kérosène - Les quantités de biodéchets nécessaires à la fabrication de biocarburants pour l'aviation civile sont si importantes qu'elles rentreront en conflit avec les autres utilisations de biodéchets (retour au sol pour la fertilité, matériaux éco-conçus ou énergie issue de la biomasse (méthanisation notamment))
Voler au kérosène de synthèse	<ul style="list-style-type: none"> - Empreinte en termes de GES neutre puisque les émissions liées à la combustion de l'hydrocarbure correspondent à la quantité de CO2 qui aura été prélevée dans l'atmosphère. 	<ul style="list-style-type: none"> - Cette technologie ne permet pas aujourd'hui d'alimenter en carburant une flotte importante. La production d'hydrogène vert étant aujourd'hui minoritaire et plus chère que l'hydrogène fait à partir de vaporeformage d'hydrocarbures, la fabrication du kérosène de synthèse est aujourd'hui limitée. - Le rendement global du procédé est très faible (de l'ordre de 20-35%).
Compenser les émissions avec CORSIA	<ul style="list-style-type: none"> - Permet de contenir l'impact de l'aviation sur la quantité de CO2 dans l'atmosphère - Permet de financer des programmes de développement à travers le monde - Ne requiert pas de diminution des émissions du secteur aérien 	<ul style="list-style-type: none"> - Le dispositif de compensation CORSIA ne vise à compenser que les émissions supérieures aux niveaux enregistrés en 2019 - La compensation ne s'applique que pour le CO2 émis en vol, ce qui exclut la part du « hors CO2 » ainsi que les émissions amont - Les compagnies aériennes pourront réduire leurs obligations de compensation si elles utilisent des biocarburants dont l'empreinte carbone n'est inférieure que de 10% comparée au kérosène - En créant des projets visant à diminuer la quantité de CO2 présente dans l'atmosphère, ce dispositif créera des conflits d'usages des terres dans les pays en voie de développement - La compensation est sensible aux aléas climatiques et météorologiques (ex : incendies de forêt)



Scénarios d'évolution envisagés entre 2030 et 2050

Afin de comprendre comment pourraient évoluer les émissions de GES du secteur aérien, nous avons bâti un modèle qui s'appuie sur 12 variables. Ce modèle est disponible en téléchargement sur le site de [BL évolution](http://www.bl-evolution.com).

Pour chaque variable, nous définissons une borne supérieure et une borne inférieure ainsi qu'une valeur de poursuite des tendances observées. Ces paramètres permettent de simuler les évolutions sans ruptures comportementales ou technologiques.

Dans le tableau suivant, le chiffre en rouge caractérise celui avec l'effet climat le plus important. Le chiffre sur fond vert correspond à l'effet climat le plus faible.

Variable	Min.	Tendance	Max.	Explications
Evolution annuelle du nombre de passagers	1,2%	2,7%	5,5%	Compte tenu des contraintes d'infrastructures, d'évolution du marché, etc. il semble difficile d'imaginer une croissance plus soutenue que 5,5% par an. La France n'ayant pas atteint le nombre de vols par habitant des pays Nord Européen, nous excluons des scénarios de diminution du nombre de passagers sans incitation forte que nous étudierons dans les scénarios de rupture.
Evolution annuelle de l'emport moyen	0%	1,4%	3,7%	L'emport moyen a nettement augmenté ces dernières années. Les avions étaient encore faiblement remplis il y a 20 ans (le taux d'occupation est passé de 64% à 84%). Les marges de manœuvres se restreignent donc et augmenter l'emport moyen revient de plus en plus à changer la flotte pour des avions plus gros. Une diminution de l'emport moyen, si elle est possible, réduirait à néant les efforts menés pour limiter la croissance des émissions du secteur aérien, nous prenons donc comme cas le plus défavorable une stagnation. Compte tenu des capacités des avions, nous fixons une limite maximum d'emport moyen à 249.
Evolution annuelle de la distance moyenne par vol	0%	1,7%	3,5%	La tendance est à la diminution des vols intérieurs ou de courte distance, notamment du fait d'une concurrence du rail. Il est donc peu probable de voir la distance moyenne diminuer. Le développement de l'aviation aux 4 coins du globe entraîne de plus en plus de vols long-courriers. L'évolution maximale constatée sur les 5 dernières années est de 3,5% par an (Orly, Beauvais, Lyon). Nous fixons une limite maximum de distance moyenne à 4 000 km, ce qui correspond à la valeur moyenne actuelle de distance par passager au départ de Roissy CDG.

Evolution tendancielle de l'efficacité énergétique	0,1%	0,1%	0,1%	<p>L'évolution tendancielle observée est de 0,1%, cela inclut les gains en efficacité liés à l'amélioration technique actuelle ou à l'optimisation du remplissage ainsi que les pertes liées à un changement de flotte pour une flotte plus imposante, l'optimisation ou non des trajets etc... Par défaut, nous considérons ce paramètre stable pour les prochaines décennies. Les gains techniques sont proposés dans les paramètres suivants.</p> <p>A noter que ce paramètre pourrait tout de même s'inverser si nous atteignons une asymptote dans les progrès techniques mais que l'emport moyen et le changement de flotte induit continue de progresser. Nous n'avons pas trouvé de valeur limite mais une approximation d'un tiers de la valeur de l'emport moyen semble un bon ordre de grandeur. Exemple : s'il n'y a pas de prolongation tendancielle des progrès techniques et emport moyen de +3%, on peut tabler sur une perte d'efficacité de -1%</p>
Gain supplémentaire technique	0%	0,6%	1,2%	<p>Les gains supplémentaires les plus évidents sont liés à l'optimisation des opérations de roulage. Le gain potentiel est de 3% à répartir au mieux sur 5 ans (scénario max, soit 0,6% par an), en moyenne sur 10 ans (tendanciel soit 0,3% par an).</p> <p>Les autres gains techniques listés par l'étude du think tank The Shift Project sont : le remplacement de certains vols par des appareils à hélice, la limitation du fuel tankering et l'optimisation des trajectoires. Le gain possible tout cumulé est du même ordre de grandeur que le gain lié aux opérations au sol.</p> <p>Compte tenu des connaissances actuelles, nous fixons une limite maximum à un gain total de 6% d'efficacité énergétique d'ici 2030 et 10% d'ici 2050</p>
Utilisation d'agro carburants	0%	0,2%	0,4%	<p>En utilisant l'ensemble des biocarburants qui pourraient être destinés au transport en 2050, cela représente 6,8 Mtep à l'échelle européenne, soit 1,2 Mtep en France, cela donne une croissance de 40 Ktep / an max, soit 0,2% de la consommation actuelle. C'est la valeur que nous utilisons en tendanciel. La valeur max. suppose le développement de nouvelles technologies de biocarburant ou l'utilisation de matières directement en concurrence avec l'alimentation</p>
Changement de carburant	0%	0,1%	0,2%	<p>Il n'existe pas aujourd'hui de technologies matures adaptées au secteur aérien. Nous incluons cela dans un volet « aviation de rupture ».</p> <p>L'utilisation de carburants de synthèse en utilisant du CO2 capturé dans l'air nécessite</p>

	Pas d'utilisation de carburants de synthèse	de celui des agrocarburants	de celui des agrocarburants	pour être compétitif un coût de la tonne de CO2 de 2 000 à 5 000 € (transport et environnement) ce qui rend son développement très incertain. Un scénario optimiste consiste à projeter un gain moitié moins élevé que celui des agrocarburants dont la technologie est plus mature
Optimisation de la production amont de kérosène	-0,3% Perte d'efficacité énergétique des procédés d'extraction	0%	0,6% Gain lié à la captation de CO2 en sortie de raffinerie à partir de 2030	La production du kérosène est soumise à de fortes contraintes inhérentes à l'industrie pétrolière. Les pétroles extraits sont de moins bonne qualité et ont un rendement énergétique décroissant tandis que la demande se focalise sur des pétroles de meilleure qualité nécessitant plus d'énergie dans le raffinage. Ainsi, la production amont de kérosène devrait plutôt avoir tendance à augmenter (0,3% par an, scénario minimal) ou à stagner (scénario tendanciel). Il existe néanmoins une possibilité, à partir de 2030, d'avoir recours aux technologies de captage du CO2 en sortie de raffinerie. En imputant à la production de kérosène 50% de ce gain, en considérant l'équipement progressif de 100% des raffineries entre 2030 et 2050 et un gain CO2 sur le procédé de raffinage de 50%, cela donne un scénario max. de 0,6% par an à partir de 2030
Diminution de l'impact des traînées de condensation	0% Aucune mesure sur les traînées de condensation	-5% Limitation progressive à partir de 2030	-10% Limitation progressive à partir de 2025	Il est possible de réduire jusqu'à 55% l'impact des traînées de condensation en optimisant les vols les plus responsables. En supposant les défis de sécurité et technologiques levés, nous pouvons imaginer un gain allant jusqu'à 10% par an à partir de 2025 et plafonné à 55% (scénario max.).
Prorata du vol pris en compte dans les calculs	53% Part minimum si les vols intérieurs hors outre-mer tombent à 0%	56,2% Affectation actuelle	64% Part des Français dans les avions	Si les vols intérieurs sont à 100% imputés aux émissions françaises, seul 50% des vols internationaux le sont. De ce fait, les normes de comptabilité actuelles font que 56,2% de l'ensemble des émissions des vols au départ ou à destination de la France sont prises en compte. (scénario tendanciel) En utilisant une autre répartition et en considérant les vols des Français dans leur intégralité, nous avons uniquement pu obtenir la répartition suivante : 60% des passagers internationaux sont Français (direction générale de l'économie). En supposant que la part des vols intérieurs fait par des étrangers compense la part des vols intérieurs dans d'autres pays fait par des Français (ce qui sous-estime certainement ce nombre), on pourrait prendre en considération 64% des émissions totales (scénario max)
Utilisation du système de compensation des émissions	0	15 000 ha	80 000 ha	Il est aujourd'hui très difficile d'estimer ce que peut apporter le système CORSIA en termes de compensation tant les impacts sont difficiles à déterminer. Par conséquent, nous avons supposé les impacts d'une compensation

	Pas de système de compensation des émissions	De surfaces transformées en forêts supplémentaires	Soit l'équivalent de l'ensemble des terres artificialisées chaque année	<p>directe et sur le territoire français liée au stockage naturel du carbone et exprimée en équivalent hectare de forêt.</p> <p>Nous retenons le potentiel de séquestration nette d'un hectare de forêt de l'ADEME : -4,8 tCO₂/ha/an. C'est-à-dire qu'un ha de forêt planté l'année N permet de stocker 4,8 tCO₂e, 4,8 autre l'année N+1 etc... L'impact augmente donc à mesure que l'on augmente la surface consacrée au stockage lié à l'aviation.</p> <p>En valeur max. nous prenons l'équivalent des terres artificialisées chaque année, soit environ 80 000 ha. En valeur intermédiaire, 15 000 ha, soit l'équivalent de 10 ha par intercommunalité par an</p>
Aviation de rupture	<p>0%</p> <p>Les moyens ne sont pas mis pour inventer l'aviation du futur</p>	<p>0,25%</p> <p>1% de renouvellement de la flotte pour un avion consommant 25% de moins dès 2035.</p>	<p>0,9%</p> <p>3% de renouvellement de la flotte pour un avion consommant 30% de moins dès 2040. 1% de renouvellement de la flotte dès 2030 (0,3%)</p>	<p>En imposant un cahier des charges strict au secteur aérien, une réglementation et des moyens financiers adéquats, nous imaginons ici l'avion du futur.</p> <p>Transport et environnement affiche un objectif de 30% en 2040, The Shift Project de 25% en 2030.</p> <p>Les temps de développement, puis d'industrialisation, de tests, de commandes et de renouvellement des avions existants rendent difficile d'imaginer un changement de plus de 3% de la flotte à partir de 2040 (scénario max). Transport et environnement compte sur 1% (scénario tendanciel)</p>

Afin d'identifier des scénarios alternatifs et de prendre en compte différentes pistes de réflexion sur l'aviation du futur, voici deux alternatives possibles aux variables d'évolution du nombre de voyageurs et d'évolution des aéronefs :

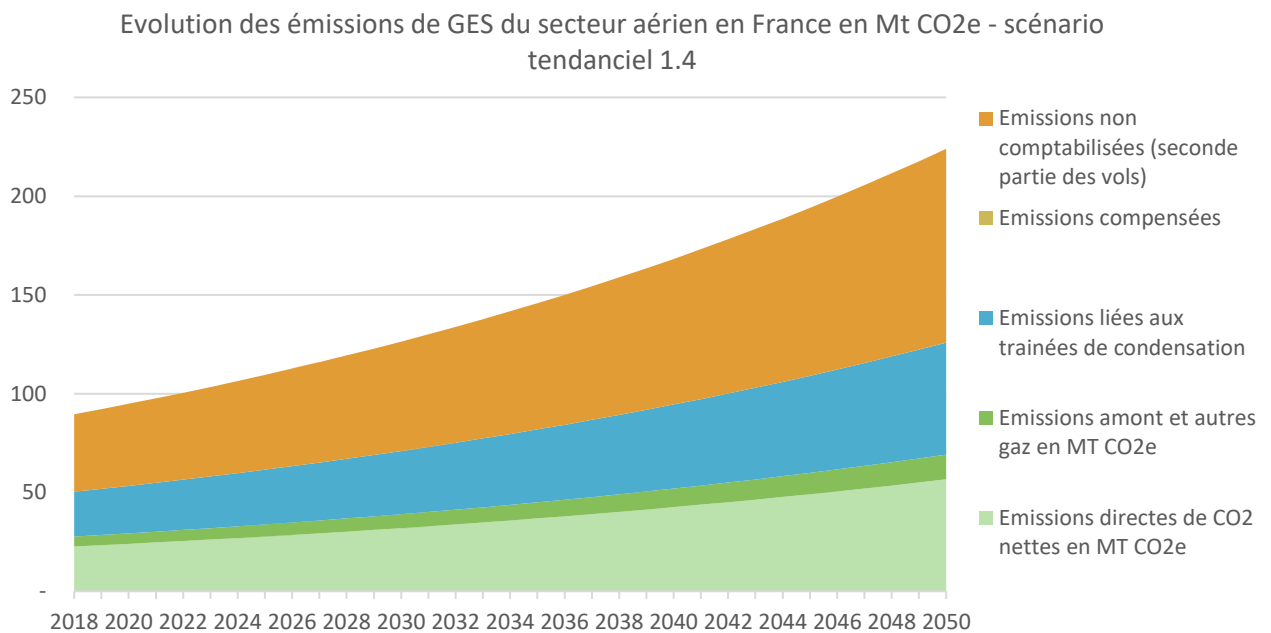
Diminution du nombre de voyageurs aériens	<p>- 1,1%</p> <p>Taxation carbone</p>	<p>- 2,5%</p> <p>Paquet de mesures de sobriété</p>	<p>- 5,5%</p> <p>Non renouvellement de la flotte d'avions</p>	<p>Diminuer le nombre de voyageurs dans un scénario de sobriété n'a pas de limite puisqu'il « suffit » d'interdire les vols aériens. La valeur max. proposée ici consiste à prendre en compte la durée de vie moyenne des avions et à ne pas les remplacer lorsqu'ils arrivent en fin de vie.</p> <p>La valeur intermédiaire consiste à appliquer les mesures de sobriété inscrites dans le rapport du Shift Project.</p> <p>La valeur minimale consiste à la mise en place d'une taxation carbone passant par une valeur de 150€ par tonne en 2030.</p>
Aviation du futur	<p>0%</p> <p>Un moratoire empêche le développement d'une aviation plus émettrice</p>	<p>-0,25%</p> <p>1% de renouvellement de la flotte pour un avion consommant 25% de plus dès 2030.</p>	<p>-0,5%</p> <p>2% de renouvellement de la flotte pour un avion consommant 25% de plus dès 2030</p>	<p>Ce paramètre est à cumuler avec le paramètre aviation de rupture.</p> <p>L'aviation du futur ne sera pas nécessairement plus verte. Différents projets ont pour ligne de mire avant tout l'amélioration du service, au détriment parfois des consommations.</p> <p>De la même manière qu'il est possible d'imaginer la généralisation d'avions à faible émission, nous pouvons imaginer l'arrivée sur le marché d'avions à plus forte émission. L'exemple des SUV au niveau automobile</p>

				démontre ; s'il le fallait, que cette hypothèse n'est pas farfelue.
--	--	--	--	---



Réduire significativement les émissions du secteur aérien relève de la mission impossible

En reprenant les tendances actuelles ainsi qu'une augmentation de l'emport moyen volontairement réduite à +1,4%/an (scénario 1B : tendanciel 1.4) pour coïncider avec des projections plus réalistes à moyen terme, les émissions de GES seraient multipliées par 2,5 d'ici à 2050 atteignant 125 Mt CO₂e, soit 1,5 fois le budget carbone global tous secteurs confondus fixé par la Stratégie Nationale Bas Carbone.



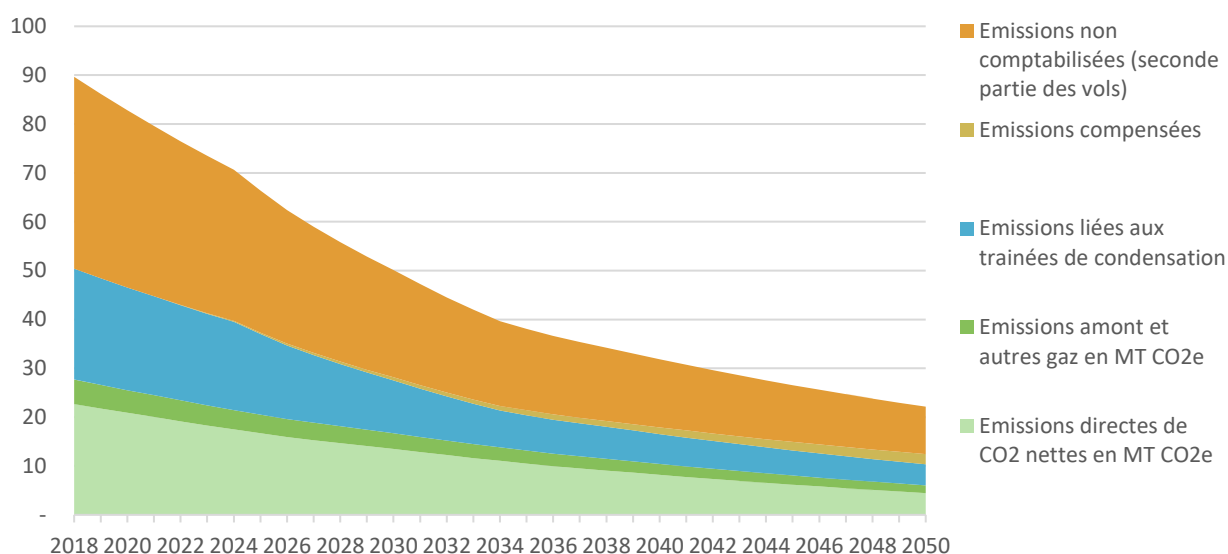
En plus de ce scénario tendanciel, nous avons modélisé 4 scénarios qui révèlent une approche différente de la gestion du secteur aérien. Le tableau suivant synthétise les principaux résultats de ces modélisations.

Scénario	Tendanciel 1.4	Croissance verte 3.7	Effet rebond	Catastrophe climat	Réaliste	Compatible SNBC	Trajectoire 1,5°C
<i>Paramétrage des taux d'évolution annuels par scénario</i>							
Passagers annuels	2,7%	1,2%	5,5%	5,5%	2,7%	-1,9%	-5,5%
Emport moyen	1,4%	3,7%	3,7%	0%	1,4%	1,4%	1,4%
Augmentation des distances	1,7%	0,0%	3,5%	3,5%	1,3%	1,3%	1,3%
Gains techniques	0,1%	1,3%	1,3%	0,1%	0,7%	0,7%	1,3%
Changements de carburants	0%	0,6%	0,6%	0%	0,3%	0,3%	0,6%
Diminution des trainées de condensation	0%	9%	9%	0%	5%	5%	9%
Aviation du futur	Non	2030	2030	Non	2040	2040	2030
Recours à la compensation (en ha)	-	80 000	80 000	-	15 000	15 000	20 000
<i>Valeurs constatées en 2050</i>							
Nombre de passagers	404 M	252 M	550 M	550 M	404 M	93 M	28 M
Emport moyen	171	249	249	110	171	171	171
Mouvements totaux	2 367 K	1 014 K	2 210 K	5 020 K	2 367 K	546 K	165 K
Distance par vol	2 744	1 600	4 000	4 000	2 419	2 419	2 419
<i>Principaux résultats observés</i>							
Emissions directes de GES entre 2020 et 2050 en MT CO2e	1 125	402	1 283	3 512	922	439	292
Emissions totales de GES entre 2020 et 2050 en MT CO2e	2 498	805	2 489	7 822	1 812	885	595
Emissions par passagers km en 2050 en gCO2e	77,3	35,7	36	120,6	62,9	62,9	52,2
Evolution des émissions de l'aviation en 2030	-36%	- 68%	- 68%	- 3%	- 47%	-47%	-55%
Emissions totales associées à l'aviation en 2050 en MT CO2e	126	7	89	446	75	16	2,3
Part de l'aviation dans le budget carbone transport France 2020 - 2050	105%	33,7%	105%	328%	76%	37%	25%

Le scénario croissance verte 3.7 est un scénario volontairement trop optimiste qui permet de comprendre où peut atterrir l'aviation en termes d'émissions de GES si tous les curseurs sont poussés au maximum. Ce scénario considère l'aviation comme une priorité, puisque certains curseurs sont tirés au détriment d'autres choses (utilisation d'agrocarburants pouvant se faire au détriment de cultures alimentaires ou d'autres moyens de transport, utilisation de l'hydrogène vert au détriment d'autres moyens de transport, utilisation conséquente de terres pour la compensation...).

Ce scénario table sur l'atteinte rapide de l'ensemble des leviers techniques disponibles et sur l'arrivée de ruptures technologiques qui ne peuvent être portées que par un investissement soutenu et des directives claires. Enfin, la demande joue également un rôle prépondérant avec une stagnation des distances moyennes et une évolution plus restreinte du nombre de passagers.

Evolution des émissions de GES du secteur aérien en France en Mt CO2e - scénario objectifs nationaux



Le scénario effet rebond montre qu'agir sur l'offre ne suffit pas. Quels que soient les efforts mis en place, si la demande explose, l'aviation empêche, à elle seule, l'atteinte de tous les objectifs climatiques.

Le scénario catastrophe climat est là pour montrer le pendant du scénario croissance verte. Il ne s'agit pas d'un scénario complètement farfelu malheureusement mais d'un scénario qui pourrait arriver si des efforts étaient mis pour favoriser l'essor de l'aviation et la qualité de service (comme un raccourcissement de la durée des vols) sans aucune prise en compte d'enjeux environnementaux.

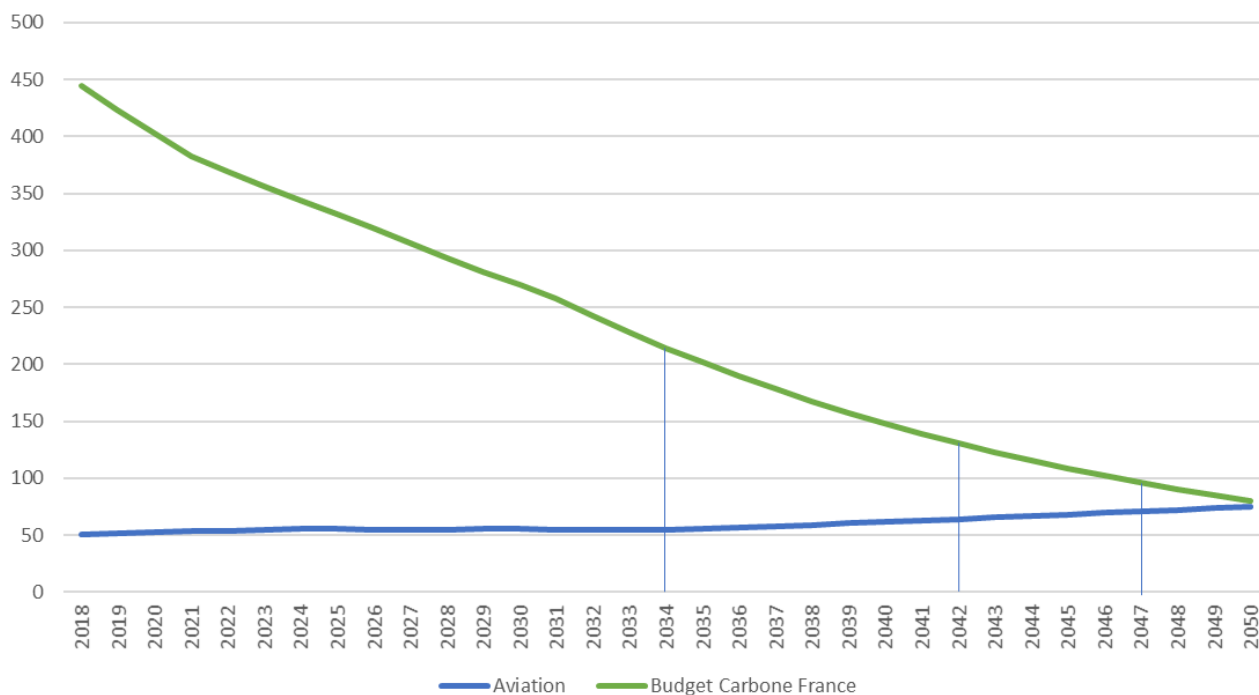
A noter que ce scénario ressemble pour beaucoup à la situation constatée en 2018, avec une évolution du nombre de passagers de plus de 5%, une distance moyenne qui a augmenté de 2,9% et les différents paramètres de gain d'efficacité qui correspondent à la trajectoire tendancielle.

Enfin, notre perception des discours et tendances actuelles nous fait dire que le scénario réaliste reproduit ce qui est dans l'air du temps, au moins pour la prochaine décennie.

Si la croissance des émissions de GES du secteur aérien est plus faible que ce que nous observons actuellement, les efforts mis pour déployer les agrocarburants ou carburants de synthèse et l'essor de la compensation carbone ne suffisent pas à maintenir les émissions de GES du secteur aérien à leur niveau de 2020.

Au regard de la SNBC, l'aviation pèsera 25% du budget carbone de la France en 2034, 50% en 2042, 75% en 2047 et représentera quasiment l'entièreté de ce budget en 2050.

Emissions de GES de l'aviation civile comparées aux budgets carbone de la France selon la SNBC (en Millions de tonnes CO2 equivalent)



Il va de soi que la poursuite de l'objectif de neutralité carbone pour le territoire français n'a de sens que si les émissions non comptabilisées dans ce calcul (aviation civile internationale), mais bien imputable à la France, sont limitées elles aussi.

Les différents scénarios que nous avons réalisés ne sont pas rassurants quant à l'atteinte des objectifs fixés par l'Union européenne ou par la France. Si ces objectifs devaient être respectés malgré l'augmentation des émissions de GES du secteur aérien cela laisserait une part extrêmement faible à l'ensemble des autres secteurs et il est peu réaliste d'octroyer plus de 80% de notre budget carbone à l'aviation, d'autant plus que les difficultés affichées ici pour diminuer fortement les émissions de GES se reproduisent pour une bonne partie des secteurs.

Il est donc nécessaire d'aller au-delà des efforts déjà entrepris et des pistes de réductions techniques pour décarboner le secteur aérien dès maintenant.

A l'heure où est débattu le plan de relance du secteur aérien, les modélisations précédentes démontrent la nécessité d'y adjoindre une directive précise visant à aller au-delà du réaliste en termes de progrès technique et d'essor des carburants alternatifs.

Malgré cela, et si la stagnation des émissions de GES du secteur aérien peut s'envisager avec des progrès techniques conséquent et immédiates, il reste inenvisageable de faire diminuer les émissions de GES du secteur aérien sans jouer de manière conséquente sur la demande.



Pour rendre compatible l'aviation avec les engagements internationaux, il faut réduire le nombre de passagers

En prenant maintenant comme premier objectif de respecter les engagements climatiques, tout en allouant à l'aviation la place qu'elle occupe actuellement dans la part des émissions de GES et celle qui lui est dévolue dans les prochaines décennies. Nous modélisons deux scénarios compatibles, issus du scénario réaliste, basés sur une évolution alternative du nombre de passagers. Il s'agit des scénarios compatible SNBC et trajectoire 1,5°C reportés dans le tableau précédent.

S'aligner sur nos objectifs tels qu'ils sont aujourd'hui définis (scénario 6) est possible et permettrait d'envisager un avenir pour le secteur aérien lors des 30 prochaines années. Mais cela ne peut se faire qu'en envisageant une décroissance du nombre de passagers, du nombre de mouvements et donc du nombre d'avions produits.

Cela a des conséquences sociales qui sont à anticiper dès maintenant, à la fois du côté des passagers que du personnel navigant, du personnel au sol ou des constructeurs aériens. Autrement dit, plus qu'un plan de relance, c'est un plan de transformation du secteur aérien dans son ensemble qui est à imaginer dès maintenant si nous souhaitons avoir une chance sérieuse de respecter nos engagements climatiques.

En revanche, à moins de chocs majeurs, comme la crise sanitaire actuelle, un effondrement des compagnies aériennes, une réglementation internationale extrêmement sévère ou un boycott total de l'aviation, ce secteur ne peut plus s'aligner avec une trajectoire compatible avec les 1,5°C.

La prise en compte d'optimisations technologiques poussées à leur extrême et un arrêt immédiat de la production d'avions ne suffiraient pas.

Pour s'aligner avec l'Accord de Paris et ne pas dépasser 2°C de changement climatique, le secteur aérien ne peut pas non plus compter uniquement sur des progrès techniques et une diminution du nombre de passagers comprise entre 2,5% et 4% par an est nécessaire³.

En d'autres termes, pour que l'aviation civile en France adopte une trajectoire de réduction des émissions nécessaire afin de viser une limitation du réchauffement climatique à +2°C, sans prendre une place déraisonnable dans les émissions territoriales françaises, il faudrait réduire de moitié le nombre de passagers annuels d'ici 20 ans maximum.



Le « Terminal 4 » de Roissy-Charles de Gaulle, un projet incompatible avec l'atteinte des objectifs en matière de climat

Au vu de l'impératif de réduction des émissions de GES liées à l'aviation d'ici 10 ans (2030) et 30 ans (2050), nous avons cherché à déterminer la cohérence des pouvoirs publics vis-à-vis de ces objectifs. L'Etat s'est en effet engagé sur les questions climatiques en signant notamment l'Accord de Paris, ainsi qu'en se donnant des budgets carbone via la Stratégie Nationale Bas Carbone. Ces engagements vont nécessairement dans le bon sens mais est ce que l'Etat se donne réellement les moyens de tenir ces trajectoires concernant le secteur de l'aviation ?

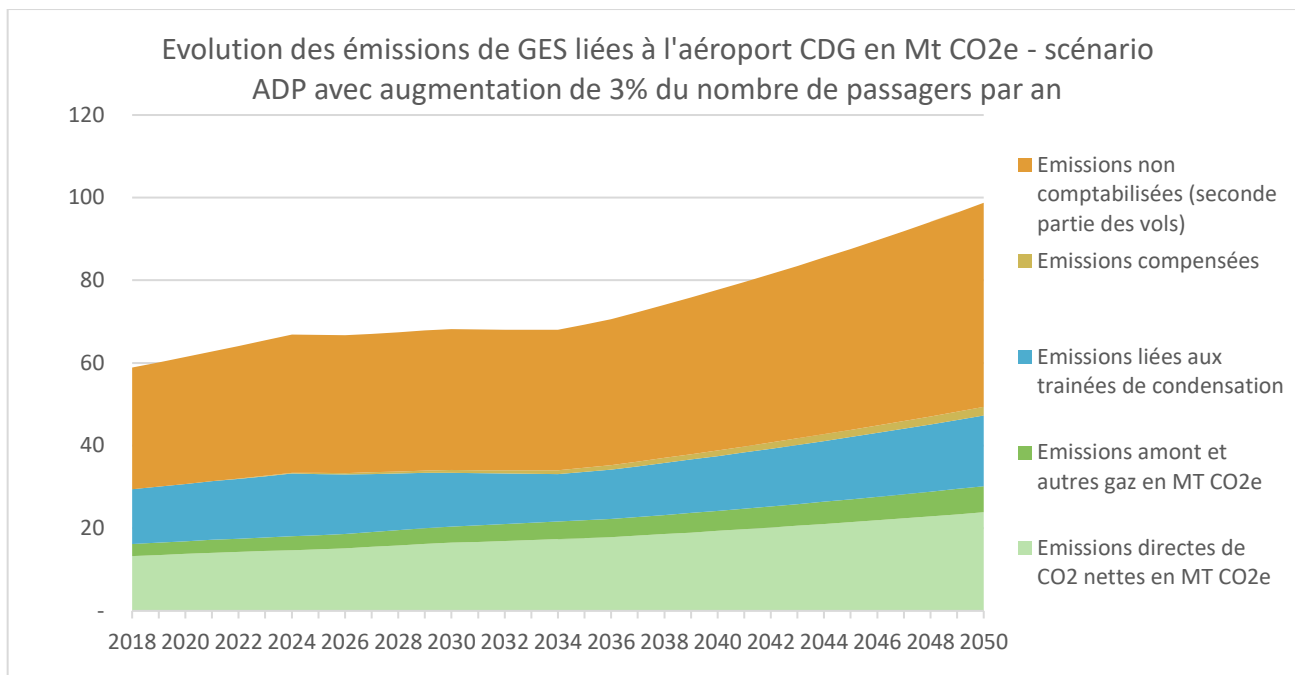
Les différents scénarios modélisés précédemment démontrent qu'il est peu crédible d'espérer restreindre les émissions de GES du secteur aérien sans une diminution du nombre de passagers ou a minima une diminution de l'augmentation du nombre de passagers. Pour autant, il continue d'y avoir sur notre territoire des projets d'extension d'aéroport. C'est notamment le cas du projet « Terminal 4 » de l'aéroport Roissy – Charles de Gaulle.

Concernant le trafic aéroportuaire, Aéroport de Paris estime que les capacités actuelles de l'aéroport Roissy - Charles de Gaulle permettraient d'accueillir 80 millions de passagers par an (contre 72,3 millions en 2018). L'extension prévue via la construction du Terminal 4 augmenterait les prévisions d'accueil de passagers entre 107 et 126 millions en 2037.

Pour justifier l'ouverture du Terminal 4, le groupe Aéroports de Paris annonce un nombre de mouvements d'environ 633 000 en 2037, tiré par une évolution du nombre de passagers de +2% à +3% par an et un emport moyen qui n'augmente plus que de 0,6% à 1,4% par an.

En reprenant les paramètres du scénario « réaliste » pour ce qui est des progrès techniques et alternatives envisageables et en les appliquant aux projections liées au projet de Terminal 4, nous constatons que la construction du Terminal 4 entraînera indéniablement une augmentation notable des émissions de CO₂, soit l'équivalent de 13 à 20 millions de tonnes de CO₂ supplémentaires par an.

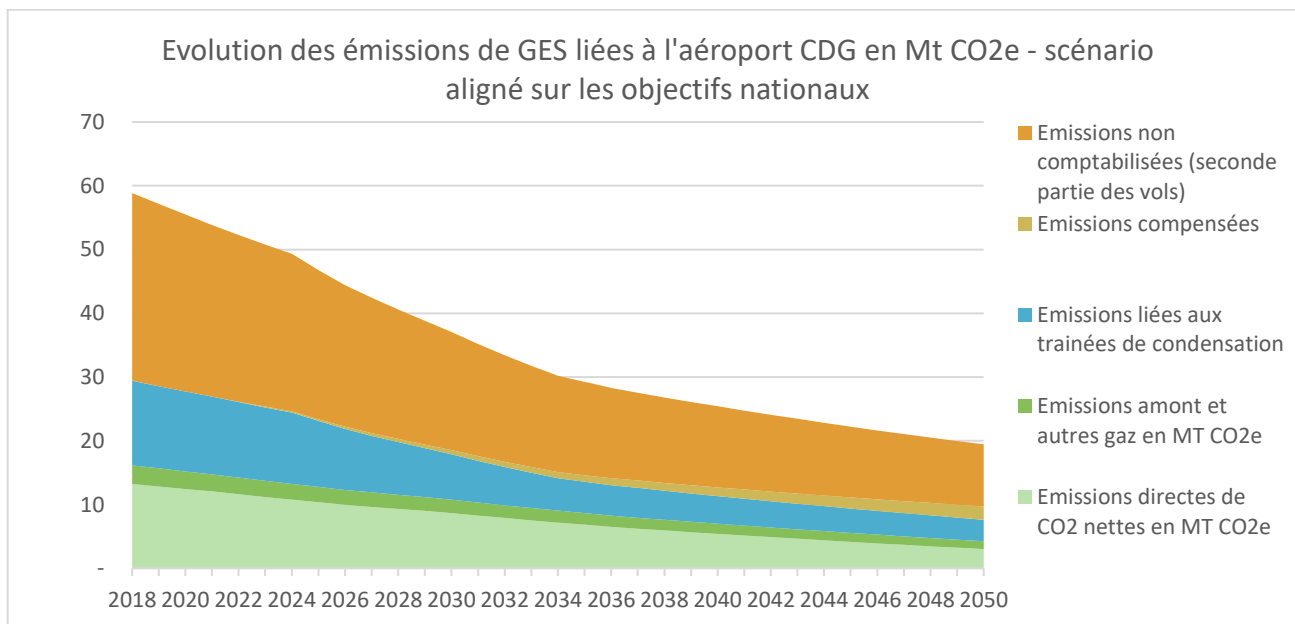
³ Rappelons que l'ensemble des engagements pris par les Etats (comme la SNBC) dans le cadre de l'Accord de Paris ne permettent pas de limiter le réchauffement en dessous de 2°C, ce qui explique pourquoi le scénario 6 est moins disant qu'un objectif 2°C



En cumulé, ce scénario montre que l'aéroport CDG émettrait uniquement pour les vols 1 113 Mt CO2e sur la période 2020 – 2050, dont 567 Mt CO2e directes.

Même en tirant tous les curseurs de progrès du secteur aérien au maximum, les projections d'ADP ne sont pas cohérentes au regard de la trajectoire de réduction des émissions de GES visée par la stratégie nationale bas carbone française.

Un scénario réaliste, qui soit cohérent avec la trajectoire de réduction des émissions de GES visée par la SNBC ne peut se construire qu'en envisageant une diminution du nombre de passagers d'environ 2% par an au départ de l'aéroport Roissy – Charles de Gaulle.



Un tel scénario permettrait d'envisager une réduction des émissions de GES de 37% en 2030, conformément aux objectifs nationaux (-32%) et européens (-36%) et d'atterrir à 3 Mt CO2e en 2050.

Alors que la trajectoire nécessaire pour respecter l'Accord de Paris impose une baisse drastique des émissions de gaz à effet de serre, la construction du Terminal 4 est purement et simplement incompatible avec ces engagements.

Si le projet de Terminal 4 est incompatible avec les engagements climatiques, ne pas le construire ne résout pas entièrement le problème car cela pourrait avoir notamment pour effet de déporter une petite partie du trafic vers les autres hubs européens bien que la conséquence première serait une augmentation des prix des billets d'avions à l'horizon 2028-2030. L'interconnexion européenne nécessite de penser à une échelle plus large les mouvements aériens et leur répartition entre aéroport et les capacités des grands hubs actuels sont suffisantes pour couvrir des besoins compatibles avec la nécessaire diminution des émissions de GES du secteur aérien. En d'autres termes, si un de ces hubs décide de s'agrandir, il le fera nécessairement aux détriments de ceux qui s'engageront dans une trajectoire plus vertueuse d'un point de vue climatique.

Vers des alternatives à l'avion

Chaque année, ce sont plus de 16 340 000 passagers voyageant sur des liaisons radiales (Région-Paris) et plus de 150 600 mouvements d'avions selon les chiffres de 2018. A la journée, cela représente 412 mouvements d'avions pour 44 767 passagers. Si l'on bascule l'ensemble du trafic vers les gares parisiennes en gardant l'emport moyen observé dans les TGV de 448 passagers (69% des capacités), voici les changements en termes de fréquentation supposée des gares parisiennes :

	Mouvements de trains par jour	Part des TGV en %	Nombre de TGV	Nombre de TGV supplémentaires	% d'augmentation
Gare du Nord	786	18	142	19	2,4
Gare Montparnasse	482	31	149	20	4,1
Gare de Lyon	301	69	208	27	9
Gare de l'Est	364	27	98	13	3,5
Marne-la-Vallée	88	100	88	12	13,1
Massy	79	100	79	10	13,1

Bien évidemment, cette augmentation de la fréquentation des gares parisiennes induira la création d'un certain nombre d'emplois ainsi qu'un potentiel agrandissement des infrastructures. Nous pouvons également supposer que l'emport moyen des TGV augmentera puisque certains voyages déjà existants sauront satisfaire les voyageurs ayant délaissé l'avion.

Le développement du train de nuit permettrait également de reporter une grande partie du trafic aérien, notamment vers des destinations européennes comme ce fut le cas pour la Suède au regard de l'épisode social de la honte de prendre l'avion (+11% de passagers dans les trains de nuit au cours de l'année 2019).

A l'échelle européenne, l'utilisation des lignes à grande vitesse par des trains de nuit, ne serait-ce que sur une partie de l'itinéraire, permettrait de desservir des destinations comme Madrid, Rome, Vienne, voire Lisbonne, Séville, Málaga, Varsovie, Copenhague, etc.

Pour ce qui est des long-courriers et notamment du franchissement des océans, le dirigeable est ce qui s'apparente le plus à une solution d'avenir pour le transport aérien en proposant une alternative intéressante sur le plan économique, capacitaire et environnemental.

Conclusion

Le transport aérien fait partie de nos vies, mais y occupe une place occasionnelle. Contrairement à l'automobile, nous ne pouvons pas dire que nos sociétés sont construites autour du transport aérien et deux Français sur trois prennent l'avion moins d'une fois par an. Pourtant, il s'agit d'un secteur fortement émetteur, qui représente 7,3% de l'empreinte carbone des Français. Tirées par une fréquentation en forte hausse, les émissions du transport aérien augmentent d'année en année, allant à contre sens des trajectoires de réductions nécessaires pour éviter le péril climatique.

Actuellement incompatible avec un avenir décarboné, l'aviation civile doit se transformer rapidement et massivement. Conscients de cet enjeu, les acteurs du secteur envisagent un panel de solutions qui permette de décarboner en partie le transport aérien. Malheureusement, au regard de l'enjeu climatique, la transformation de ce secteur arrive une génération trop tard. Si les améliorations techniques, bien que parfois encore très théoriques, sont indispensables, elles ne permettront pas, même dans une vision très ambitieuse, d'orienter le secteur du transport aérien vers une trajectoire compatible avec la volonté de limiter le réchauffement climatique à 2°C.

Des mesures de sobriété dans notre rapport à l'aviation sont donc indispensables. Loin de s'opposer aux progrès techniques, il s'agit d'une complémentarité nécessaire pour limiter la casse et cela doit réinterroger notre rapport à l'aviation. Si nous prenons au sérieux les engagements internationaux en matière de climat et si nous considérons que l'aviation civile doit garder une part raisonnable dans notre empreinte carbone, la fréquentation des aéroports doit diminuer rapidement et fortement. En fonction de notre capacité à développer une aviation décarbonée, le nombre de passagers doit être divisé par deux d'ici 10 à 20 ans pour se laisser une chance de rester sous 2°C de réchauffement climatique.

Cela n'empêche pas de faire le voyage de sa vie, de retrouver sa famille, de s'expatrier ou d'assurer quelques fonctions indispensables, mais cela remet fortement en cause l'aviation de masse et les déplacements rapides, loin et pour une courte durée qui constituent une partie de notre activité touristique.

En revanche, à moins de subir des chocs majeurs, le transport aérien ne peut plus s'aligner avec une trajectoire compatible avec les 1,5°C, du seul fait des émissions projetées de la flotte d'aéronefs déjà existante. Continuer de croire dans la massification du transport aérien, c'est acter la défaite de nos politiques d'atténuation et cela nécessite de penser dès maintenant des mesures d'adaptation à un monde qui va devenir de plus en plus invivable.

Rapport complet

Introduction

Dans notre étude « Comment s’aligner sur une trajectoire compatible avec les 1,5°C »⁴ nous dressons un panorama de l’ampleur et de la rapidité des mesures à mettre en place pour s’aligner sur une trajectoire compatible avec les 1,5°C. Nous nous sommes alors rendu compte que la place de l’aviation était un sujet qui cristallisait beaucoup les points de vue. Tantôt décrit comme indispensable à l’exercice de nos libertés, dont la place dans l’ensemble des émissions de gaz à effet de serre d’origine humaine reste anecdotique, tantôt comme un appareil à brûler rapidement du CO₂, et donc incompatible avec l’atteinte de nos objectifs carbone.

Fort d’une croissance exceptionnellement élevée ces dernières décennies, le transport aérien ne peut plus être laissé de côté comme si sa place était peu significative. Archétype des progrès technologiques que l’humanité a connu, l’avion a rendu possible ce qui n’aurait jamais pu être imaginé moins d’un siècle avant : parcourir les airs et se retrouver à l’autre bout du monde en quelques heures à peine. L’avion est venu pourfendre les limites physiques que nous connaissions, et cette rupture anecdotique s’est répétée voire systématisée à mesure que l’avion s’est installé dans nos paysages.

Au regard de la contraction indispensable de nos activités émettrices en gaz à effet de serre, le secteur de l’aviation nous a semblé être devenu trop gros pour échapper à l’inventaire de l’empreinte écologique de la France. Ainsi, nous avons voulu évaluer sa véritable part dans le réchauffement climatique constaté et celui à venir. Cette première étape de connaissance du secteur est un prérequis fondamental pour appréhender l’avenir d’un secteur qui ne cesse de croître au risque de se brûler les ailes.⁵

⁴ <http://bl-evolution.com/portfolio/comment-saligner-sur-une-trajectoire-compatible-avec-les-15c/>

⁵ Dans la mythologie grecque, Icare, porté par sa curiosité et un désir de repousser toujours plus loin les frontières de l’exploration et de la connaissance, transgresse les règles fixées par son père qui lui avait interdit de se rapprocher du soleil avec ses ailes faites de plumes et de cire. Icare refusa de se limiter, au risque de soumettre sa condition humaine à une épreuve qui lui sera fatale. Alors qu’il volait toujours plus haut, le soleil finit par faire fondre la cire de ses ailes et provoqua sa chute.

I. Le secteur aérien en chiffres

Avant de décrire l'impact carbone du secteur aérien, petit panorama des principaux éléments constitutifs de ce secteur en France.

I.1. Un secteur en forte croissance, mais dont le nombre d'emplois directs diminue

En termes d'emplois, l'ensemble des aéroports sur le territoire national représentait en 2013 l'équivalent de 429 400 emplois (directs, indirects et induits) :

« Sur le plan macroéconomique, l'étude ⁶ estime que les impacts directs, indirects et induits des aéroports européens produisent près de 4,5 millions d'emplois et 147 milliards d'euros de revenus et contribuent à hauteur de 248 milliards d'euros dans le PIB. En France, la contribution de ces effets s'élève à 429 400 emplois en 2013. » ⁷

Ce chiffre peut même grimper à 1 million d'emplois si l'on prend en compte tout ce qui est permis par l'aviation civile notamment en termes de tourisme et de commerce. Ainsi, un rapport du groupe de travail présidé par le député Bruno Le Roux précise la part du secteur de l'aviation :

« Le poids économique de l'aviation civile en France a été estimé en considérant le transport aérien dans sa globalité : compagnies, aéroports, services de navigation aérienne et construction aéronautique. Sur cette base, l'aviation génère près d'un million d'emplois (300 000 emplois directs et un peu plus du double pour les emplois indirects, induits ou les emplois dans le tourisme et le commerce générés par le transport) pour une activité économique de 75,2 milliards d'euros. » ⁸

Au total, il y aurait donc près d'un emploi sur trente en France (environ 3%) qui dépendrait directement ou indirectement du secteur de l'aviation civile.

La France a la particularité d'avoir une filière de construction aéronautique très importante et qui prend une place significative dans les emplois directs de la filière avec un peu plus de 60% des emplois directs.

En ne prenant en compte que la partie liée au transport de personnes, hors construction d'avion, le secteur aérien regroupe environ 110 000 emplois. A noter que ce secteur, malgré l'augmentation continue du nombre de vols et du nombre de passagers voit ses emplois diminuer. Le recensement des emplois du secteur, réalisé par l'Observatoire des métiers de l'aérien, témoigne d'une réduction de 4% sur quatre ans des effectifs, passés de 115 000 en 2008 à 110 000 en 2012.

Effectifs du secteur au 31 décembre

	2008	2009	2010	2011	2012	2012/2008
PN	31 130	30 613	30 643	31 176	30 545	-2%
PS	45 473	44 414	43 357	41 450	41 409	-9%
Compagnies	76 603	75 027	74 000	72 626	71 954	-6%
AE + aéroports	28 154	28 123	28 978	29 010	29 231	4%
Sûreté	10 450	9 800	9 750	9 750	9 350	-11%
Total	115 207	112 950	112 728	111 386	110 535	-4%

Source : URSSAF, ACOSS, Sûreté aérienne - (périmètre codes NAF 51.10Z, 51.21Z et 52.23Z + sûreté)

9

⁶ ACI Europe, The impact of an airport, 2015.

⁷ Conseil Supérieur de l'Aviation Civile, Rapport sur le maillage aéroportuaire français, Les études d'impact des aéroports français régionaux et locaux sur les territoires, 2017

⁸ Rapport du groupe de travail « compétitivité du transport aérien français », 2014

⁹ PN = Personnel navigant / PS = Personnel au sol

Si on se focalise sur les emplois du transport aérien, on observe une baisse importante du nombre d'emplois, malgré la croissance du secteur. Cette baisse tendancielle devrait se poursuivre puisque le projet de ciel unique européen « SESAR » vise également une division par deux des coûts liés au contrôle aérien en utilisant la technologie pour automatiser au maximum ces activités. On peut supposer que cette diminution du « coût » ne pourra se faire sans réduction des effectifs.



L'essentiel de la baisse du nombre d'emplois est d'ailleurs lié au transport de passagers dont les effectifs sont en baisse de 12% entre 2010 et 2015.

Si l'on en juge par le nombre d'emplois, le transport aérien n'est donc pas un secteur en très grande forme. Par ailleurs, cela suggère une volonté de rationalisation des coûts qui ne facilite pas la compatibilité avec la transformation d'un secteur dans une perspective bas carbone.

I.2. Quelques chiffres clés du secteur aérien

Afin de bien se représenter ce à quoi correspond le secteur aérien en France, voici quelques chiffres clés ¹¹ :

- En 2018, il y avait 172,4 millions de passagers aériens en France, soit une hausse de 5,1% par rapport à 2017.
- En matière commerciale de Fret et poste, on compte 2,51 millions de tonnes transportées (soit 25,1 millions d'équivalents passagers ¹²).
- On estime en 2018 à 292,9 milliards de PKTeq (équivalent passager kilomètre, c'est-à-dire la somme des kilomètres parcourus avec 1 passager ou 100kg de fret) pour 1,54 millions de mouvements commerciaux en France.
- La durée de vie utile moyenne d'un avion est de 18 ans. ¹³

¹⁰ Observatoire Prospectif des Métiers et des Qualifications de l'Aérien, Rapport EMPLOI année 2015, édition 2016. A noter que ces chiffres ne prennent pas en compte le personnel des aéroports hors personnel de sûreté.

¹¹ Les données présentées sont issues du document suivant : Direction du transport aérien, DGAC, (Ministère de la transition écologique et solidaire), Les émissions gazeuses liées au trafic aérien en France en 2018

¹² Un passager correspond à 100kg de fret

¹³ Stratégie Nationale Du Transport Aérien 2025, Ministère de la transition écologique, 2020

I.3. Une part des émissions de gaz à effet de serre nationales en forte croissance

Définir la juste part des émissions de GES du secteur de l'aviation nécessite de bien déterminer le périmètre pris en compte et la part des émissions imputées à chaque vol.

Selon les estimations TARMAAC¹⁴, en 2018, les émissions de CO₂e pour le transport aérien en France (en prenant en compte 50% des Longs Courriers internationaux, les 50% restants étant imputés au pays de destination) s'élèvent à **22,7 millions de tonnes équivalent CO₂** et sont en progression de +3,8% par rapport à 2017 alors que le trafic a progressé de +5,1% en passagers-équivalents et de 5,5% en passagers-équivalents-km-transportés.¹⁵

Ce chiffre ne représente que l'aviation commerciale, il faut y ajouter environ 0,5 Mt CO₂e pour l'aviation non commerciale (aviation privée), ce qui porte le total à **23,2 Mt CO₂e**.

Le trafic intérieur pèse 4,8 Mt CO₂e dont 2,5Mt CO₂e pour l'outre-mer, soit 21% des émissions de GES pour les vols intérieurs et 79% pour les vols internationaux. A noter que depuis 2000 les émissions internes à la Métropole ont diminué de 28%.

Selon l'inventaire des émissions nationales de GES, les émissions de GES de la France en 2018 sont estimées à 445 Mt CO₂e dont 136,8 Mt CO₂e imputables au secteur des transports. Cet inventaire ne prend en compte que les vols intérieurs, par convention, les vols internationaux étant sortis des inventaires nationaux.

En ajoutant à ce bilan les émissions liées aux vols internationaux selon la méthodologie TARMAAC, cela donne un inventaire national de 463 Mt CO₂e dont 154,5 Mt CO₂e pour les transports.

En 2018, l'aviation civile « pèse » donc l'équivalent de 5% des émissions intérieures de la France et 15% des émissions liées aux transports.

Cependant, ce premier résultat ne prend en compte que les émissions liées au roulement et au vol des avions. Sont exclus les émissions liées à la fabrication du kérosène et aux aéroports. Ne sont pas non plus pris en compte les impacts climatiques autres que celui du CO₂. Nous reprendrons en détail ces données au chapitre II.1.

Si on prend en compte l'ensemble des gaz à effet de serre (GES) émis pour le vol des avions (prenant en compte le CO₂ émis en amont des phases de vol ainsi que les traînées de condensation), en 2018, **le secteur de l'aviation civile française représentait plus de 50 Mt CO₂e, soit 10,3%¹⁶ des émissions intérieures de la France et 28%¹⁷ des émissions des transports.**

Selon le CITEPA, l'aviation civile française représente l'équivalent de 70,3% des émissions issues des véhicules particuliers (71,4Mt CO₂e).¹⁸ Ce chiffre est à modérer sur plusieurs points : l'aviation civile inclut également le transport de fret, celui-ci représentant environ 25% des tonnes.kilomètres transportés, et la fabrication du carburant n'est pas incluse dans le calcul du CITEPA. De ce fait, nous pouvons plutôt considérer que le transport de passagers en avion est de l'ordre de 50% des émissions issues des véhicules particuliers, bien que le transport de marchandises s'effectue en grande partie en soute et ne serait donc pas possible sans transport de personnes.

¹⁴ Outil développé par la DGAC en partenariat avec le CITEPA, dont la méthode est explicité ici : <https://eco-calculateur.dta.aviation-civile.gouv.fr/comment-ca-marche>

¹⁵ Direction du transport aérien, DGAC, (Ministère de la transition écologique et solidaire), Les émissions gazeuses liées au trafic aérien en France en 2018

¹⁶ Avec cette approche complète, l'aviation civile émet 50 Mt CO₂e sur un inventaire de 490 Mt CO₂e

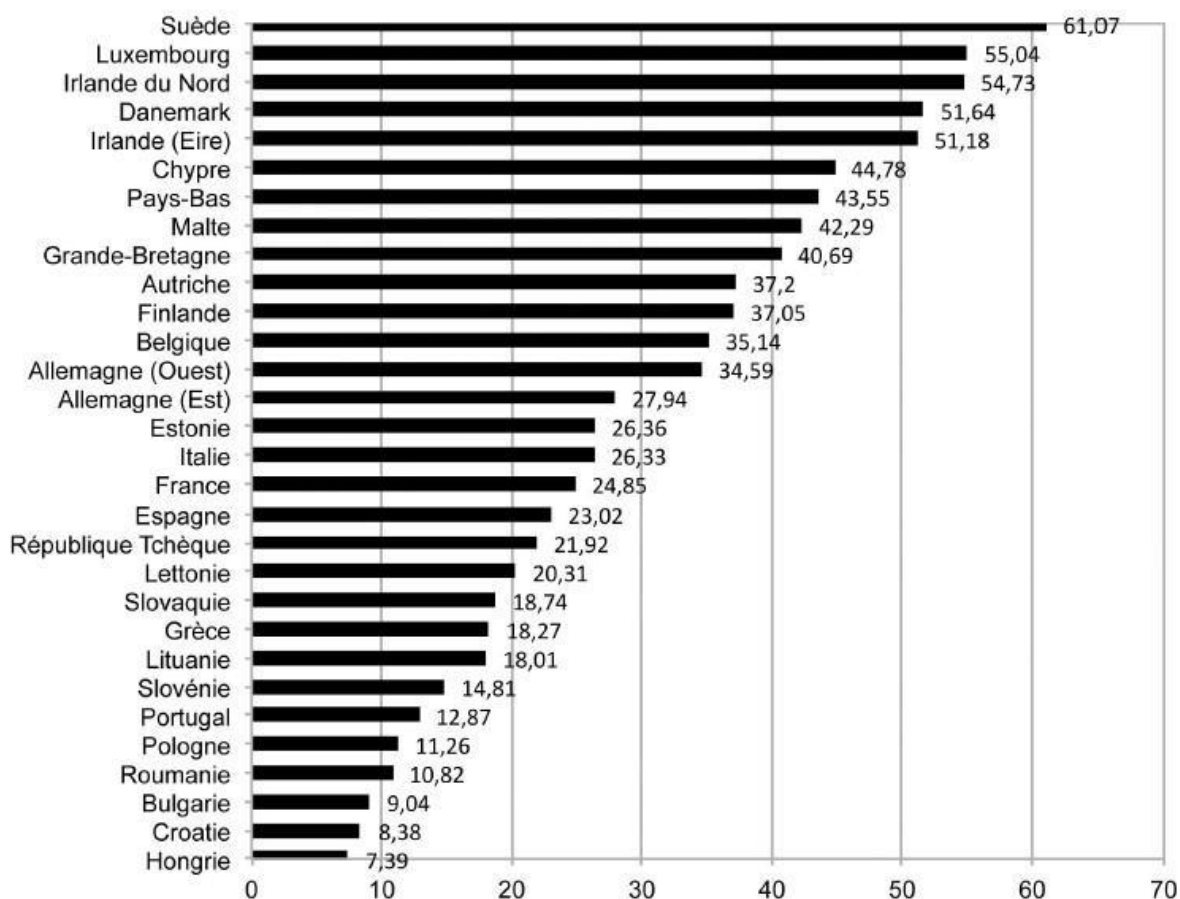
¹⁷ Avec cette approche complète, l'aviation civile émet 50 Mt CO₂e sur un inventaire de 180 Mt CO₂e

¹⁸ Données CITEPA

I.4. De fortes disparités dans l'accès à l'aviation

Une enquête réalisée en 2015 montrait que 19% des Français n'avaient jamais pris l'avion de leur vie, 41% l'ont déjà pris moins de 10 fois aller et retour, 30% l'ont pris entre 10 et 50 fois et 10% l'ont déjà pris plus de 50 fois. ¹⁹

Au niveau de la fréquence de vols, selon une enquête Eurobaromètre ²⁰, 24,85% des Français ont pris l'avion en 2014. Nous pouvons d'ailleurs constater une forte disparité entre les pays européens, avec un écart de 1 à 9 entre les Hongrois (7,4%) et les Suédois (61%).

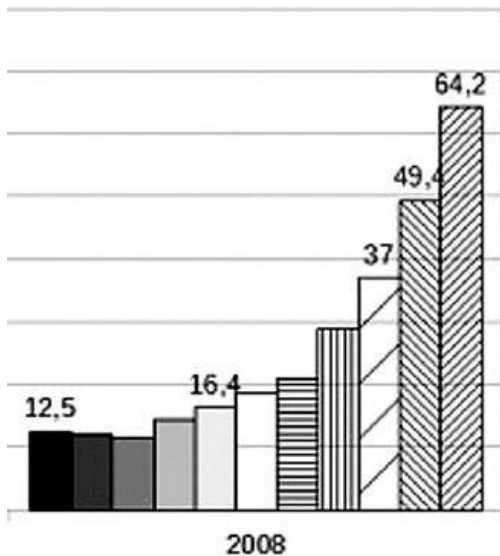


Champ : ensemble des individus de 15 ans et plus. Lecture : en Suède, 61 % des individus ont pris l'avion au cours des douze mois précédant l'enquête.

De manière générale, l'accès et la fréquence de vol n'est pas la même pour toutes les catégories sociales.

¹⁹ Statista Research Department, Nombre d'allers-retours en avion effectués par les Français durant leur vie 2015, 25 avr. 2015

²⁰ Eurobaromètre 82.1 sur la qualité des transports.



Ce graphique reprend pour l'année 2008 la part du décile (tranche de 10% de la population française) ayant pris l'avion au cours des deux années précédentes. A noter que la dernière barre représente le 1% des Français les plus riches.

On lit donc :

« En 2008, parmi les 10% des Français les plus pauvres, 12,5% ont pris l'avion »

« 49,5% des Français parmi les 10% les plus riches ont pris l'avion en 2008 »

Ce graphique montre que l'accès à l'aviation est relativement constant pour les 50% des moins hauts revenus et augmente ensuite de manière exponentielle.

A noter également que la fréquence des vols n'apparaît pas sur ce graphique, les pourcentages de la population les plus aisés ayant tendance à prendre l'avion parfois plusieurs fois par an.

En termes de catégories sociales, en 2008, sur 100 voyageurs qui ont effectué plus d'un voyage en avion au cours des trois derniers mois, plus de 55 sont des cadres.²¹

L'accès à l'aviation reste donc inégalitaire et celui-ci reste « **un marqueur social fort** »²².

I.5. La place de l'aviation dans les textes législatifs sur les émissions de GES

Au niveau national, l'aviation n'est pas réellement régulée. Les émissions des liaisons domestiques figurent bien dans les inventaires d'émissions des États et dans les objectifs de réduction des gaz à effet de serre mais sans véritable encadrement de la place que doit prendre l'aviation.

Au niveau local, certains documents règlementaires peuvent agir sur l'aviation dans la mesure où celle-ci gêne des riverains. Des Plans d'Exposition au Bruit (PEB) sont censés réguler les fréquences de vol au-dessus des habitations. Des arrêtés viennent ajouter des restrictions d'exploitation d'aéroports entre certaines heures pour ne pas déranger les riverains.

Pour ce qui est des émissions imputables aux vols internationaux, la réglementation est encore plus timide car il n'existe pas de réel système juridique sur lequel baser ses engagements.

Concernant le kérosène, **la convention de Chicago de 1944** exempte de toute taxe le carburant aérien destiné aux vols internationaux, elle n'empêche cependant pas la taxation des vols domestiques, qui est effective dans des pays comme les États-Unis ou le Japon.

En 2019, des amendements à la Loi des mobilités en France ont été déposés allant dans le sens d'une taxation du kérosène pour les vols domestiques. Ceux-ci ont été rejetés en commission parlementaire. En revanche, une éco-contribution sur les billets d'avion a été annoncée à la suite du conseil de défense écologique du 9 juillet 2019 et confirmée le 17 octobre suivant à l'Assemblée Nationale à travers le projet de loi des finances 2020 (PLF 2020). Cette contribution est une

²¹ Yoann DEMOLI et Jeanne SUBTIL, Boarding classes. Mesurer la démocratisation du transport aérien en France (1974-2008), Presses Universitaires de France, « Sociologie » 2019/2 Vol. 10 | pages 131 à 151

²² Ibid.

augmentation de la Taxe de Solidarité sur les Billets d'Avion (Taxe Chirac) créée en 2006. La part « climatique » de **cette taxe s'appliquera sur les billets d'avion au départ de la France (exception faite pour les vols à destination de Corse ou d'Outre-Mer) d'un montant de 1,50 € pour les vols domestiques ou intra Union Européenne en classe économique à 18€ en classe affaire hors Union Européenne**. La somme collectée, évaluée à 182 millions d'euros, sera affectée à l'AFITF (l'Agence de financement des infrastructures de transport en France). Loin de pouvoir avoir un impact sur le trafic aérien, cette taxe est présentée comme ouvrant la voie à une taxation future du kérosène.

Outre la question de la taxation du kérosène sur les vols internationaux balayée par la convention de Chicago, l'introduction d'un mécanisme de régulation des émissions de l'aviation civile internationale a eu lieu lors de la signature du protocole de Kyoto en 1997.

L'article 2.2 du protocole de Kyoto précise en ce sens :

« Les Parties visées à l'Annexe I cherchent à limiter ou réduire les émissions de gaz à effet de serre non réglementées par le Protocole de Montréal provenant des combustibles de soute utilisés dans les transports aériens et maritimes, en passant par l'intermédiaire de l'Organisation de l'aviation civile internationale et de l'Organisation maritime internationale respectivement »

L'OACI est donc le régulateur de l'aviation civile internationale, alors que l'OACI a été créée précisément dans l'objectif d'assurer le développement de l'activité aérienne. **L'OACI se retrouve donc dans une position visant à assurer le développement de l'aviation tout en limitant son impact climatique**. Nous allons voir dans la suite de l'étude qu'il s'agit de deux objectifs difficilement conciliables. Une situation qui n'est pas inédite puisqu'un principe similaire est associé aux fournisseurs d'énergie qui ont l'injonction de faire des économies d'énergies.

L'Union Européenne a décidé de prendre la question de l'impact environnemental de l'aviation à bras le corps et a décidé à partir de 2012 que les émissions des compagnies aériennes dépassant un certain niveau seraient obligatoirement compensées via l'achat de quotas sur le marché européen du carbone « *European Trading Scheme* » (ETS). Cependant, face à cette mesure d'application trop large suscitant des tensions internationales fortes contre elle, l'Union Européenne a été contrainte de revoir son ambition à la baisse en appliquant cette mesure uniquement aux émissions produites dans le cadre d'un vol interne à l'espace économique européen en attendant qu'un système de régulation international approprié soit dégagé. Aujourd'hui, l'Union Européenne distribue gratuitement 82% des quotas aux compagnies aériennes, c'est-à-dire que seulement 18% des émissions font l'objet d'achats de quotas dont l'UE a la main sur le nombre disponible.

C'est dans ce contexte que l'OACI a décidé lors de son assemblée générale de 2016 de développer un système international de compensation des émissions de l'aviation civile internationale : **le « Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation » (CORSIA)** qui sera mis en place progressivement à partir de 2021 pour les Etats volontaires et 2023 pour les autres. Ce système pourrait aspirer celui reposant sur les quotas de l'Union Européenne en proposant une ambition revue à la baisse par rapport au système européen d'échange des quotas. Nous analyserons plus en détail ce dispositif (CORSIA) au chapitre IV.7.

D'autres tentatives ont eu lieu au niveau européen mais elles n'ont jamais donné suite à de véritables mesures. En effet, dès novembre 1996, la Commission européenne a publié un rapport recommandant la taxation du kérosène. Une étude d'impact (*Analysis of the taxation of aircraft fuel – 1999*) a par la suite révélé que certains vols seraient détournés pour contourner cette taxe et que par conséquent, le secteur de l'aviation européen serait moins compétitif. **Le projet de taxation a donc été enterré**²³.

Un projet de redevance a alors émergé au regard des impacts négatifs d'une potentielle taxation. La commission a alors demandé un rapport ²⁴ permettant d'évaluer son application. Cette étude n'a ensuite connu aucun débouché : ni au Conseil, ni au Parlement et n'a fait l'objet d'aucune proposition de la Commission.

²³ Selon le rapport Gibblin "Maîtrise des émissions de gaz à effet de serre de l'aviation civile", 2.2.A (page 29)

²⁴ Commission Européenne / CE Delft : Climate impacts for international aviation and shipping – septembre 2004

II. Les émissions de CO2 de l'aviation aujourd'hui, de quoi parle-t-on ?

II.1. Qu'est-ce qui entre en jeu dans le calcul des émissions de CO2 de l'aviation ?

CO2

Viennent tout d'abord les émissions liées à la combustion du kérosène durant les phases de roulage et de vol. En termes d'émissions, 1L de Kérosène (Jet A1 ou Jet A) émet 2,52kg de CO2e. Si on ajoute les émissions en amont de la consommation du carburant (production et distribution), il faut ajouter 0,21 kg de CO2e par kg de CO2 émis en vol selon l'ADEME. Soit 0,53kg CO2e par litre consommé.

Au total, la plateforme « [eco calculateur de l'aviation civile](#) » qui fait référence en la matière estime donc qu'1L consommé pendant le vol représente des émissions de GES de 3,075 kg CO2e.

La modulation des émissions de GES en fonction des vols s'explique ensuite par différents paramètres :

- L'avion utilisé et sa consommation en L/heure ou L/km qui variera en fonction de différents paramètres d'efficacité du moteur ou de masse de l'avion
- Les paramètres de vols : vitesse, altitude, sens du vent...
- Les différentes phases du vol : décollage et atterrissage consomment plus de carburant.²⁵

Traînées de condensation

En sortie de réacteur, en plus des éléments chimiques sous forme gazeuse (principalement CO2) on retrouve également de la vapeur d'eau ainsi que de petites particules provenant des impuretés du kérosène.

Celles-ci, si elles sont émises à une certaine température, vont servir de point de concentration de l'humidité (induite notamment par la vapeur d'eau résultant de la combustion du kérosène) formant ainsi de fines gouttelettes laissées en suspension après le passage de l'avion. Ces accumulations de gouttelettes forment ainsi les longues traînées blanches que l'on peut apercevoir dans le ciel après le passage d'un avion. De plus, ces traînées de condensation peuvent induire une nébulosité supplémentaire sous forme de cirrus aux effets réchauffant. On estime que l'ensemble a un pouvoir réchauffant similaire au CO2 émis pendant le vol.

Les principales « impuretés » participant à la formation des traînées de condensation sont :

- Les composés aromatiques (HAP) qui sont issus d'une combustion incomplète du kérosène et se présentent sous forme de molécules de carbone et d'hydrogène.
- Le soufre dont la combustion est à l'origine de noyaux de condensation de la vapeur d'eau.²⁶

Ces traînées s'observent à des altitudes très hautes (entre 8 000 et 12 000m), lorsque certaines conditions sont réunies : une humidité bien présente et des températures se situant au-dessous de -40°C.

L'identification du pouvoir réchauffant de ces traînées de condensation n'est pas encore complètement aboutie car de nombreux paramètres rentrent en compte. Aujourd'hui, l'ADEME considère que le pouvoir de réchauffement induit par les traînées de condensation et les cirrus est équivalent à celui du CO2 lié à la combustion du kérosène. **Ainsi, pour 1L de kérosène, 2,52 Kg de CO2e supplémentaires sont émis via les traînées de condensation.**

²⁵ Le régime moteur passe à 100% lors de la phase de décollage, ce qui proportionnellement au temps de la phase la rend extrêmement émissive.

²⁶ La teneur maximale en soufre du carburéacteur est de 0,3% ; pour l'automobile, elle est de 0,005% depuis le 1er janvier 2005.

Autres gaz (Ozone O3 ; Méthane CH4)

Les émissions d'oxydes d'azote (NOx) par les avions ont un double effet antagoniste relativement similaire comme le rappelle le GIEC : « *En plus d'augmenter les concentrations d'ozone dans la troposphère, il y a lieu de s'attendre à ce que les émissions de NOx par les aéronefs diminuent la concentration du méthane dans l'atmosphère* ». ²⁷

On estime ainsi que les émissions de NOx augmentent les quantités d'ozone mais diminuent les quantités de méthane. Le bilan de cette addition puis soustraction de gaz à effet de serre serait faible. A noter cependant que l'ozone aura une tendance à réchauffer une zone plus petite, tandis que le méthane aura un pouvoir réchauffant sur l'ensemble de la planète. **Il s'agit donc d'un paramètre à surveiller, dont les évolutions locales et globales pourraient ne pas se compenser.** Même si l'approximation faite aujourd'hui est de les ignorer, certains travaux tendent à démontrer que l'impact est significatif ²⁸.

II.2. Une place à part dans la comptabilité des émissions mondiales

Le secteur de l'aviation profite d'un vide en matière de comptabilité carbone étant donné que les émissions liées aux vols internationaux sont difficilement imputables à un pays unique (doit-on considérer le pays de départ, celui d'arrivée, celui qui est survolé, celui de la compagnie ou celui des passagers ?). En France, l'Etat a pris des engagements concernant ses émissions territoriales et par conséquent, seuls les vols domestiques (décollage et atterrissage en France) sont pris en compte. **Ainsi, dans la Stratégie Nationale Bas Carbone, les budgets attribués à la France intègrent uniquement les vols domestiques.** Seule l'OACI (Organisation de l'Aviation Civile Internationale) se pose en autorité de régulation de ce secteur.

Si le rôle de l'OACI a l'avantage d'assembler une autorité régulatrice du secteur, cela pose des difficultés dans l'agrégation des inventaires et des responsabilités. En effet, un vol Paris-Berlin par exemple, sera considéré dans les vols internationaux, donc non comptabilisé, ni par la France, ni par l'Allemagne, et pourtant il sera comptabilisé comme vol intérieur par l'Union Européenne, et sera donc inscrit dans la stratégie climatique européenne.

Pour éviter ce biais, une autre convention est alors utilisée, il s'agit de répartir la phase de décollage et la moitié du vol au pays de départ et l'atterrissage et l'autre moitié au pays d'arrivée. Cela a l'avantage de pouvoir répartir l'ensemble des émissions de GES entre les pays, c'est ce qui est utilisé par la méthode TARMAAC.

Néanmoins, l'inventaire national des émissions de gaz à effet de serre soulève quelques limites d'usages, notamment car il se présente sous une approche de production et non de consommation. Il est ainsi fréquent d'utiliser également l'empreinte carbone pour avoir un autre éclairage sur les émissions d'un territoire ou d'un individu. Ainsi, selon la stratégie nationale bas carbone, l'empreinte carbone de la France s'établit à 749 millions de tonnes de CO2e en 2017.

Dans une approche empreinte carbone, l'ensemble des passagers km réalisés par des individus du territoire étudié (habitant français pour la France) est à prendre en compte. Cela représente à la fois les vols au départ ou à destination d'aéroports français mais également de vols au départ et à destination d'autres aéroports, effectués par les habitants français. Ainsi, cette approche permet de définir fidèlement la responsabilité des habitants d'un territoire donné. Cependant, les données sont difficiles à obtenir et dans la suite de l'étude nous allons faire l'approximation que l'empreinte carbone aviation de la France correspond à la part des français dans les vols internationaux au départ ou à destination de la France additionnée de l'intégralité des vols nationaux. Nous supposons ainsi que la part des étrangers dans les vols nationaux compense les vols de Français n'ayant ni pour point de départ, ni pour point d'arrivée un aéroport français.

En fonction des différentes approches, et de l'exhaustivité du périmètre en termes de GES, le « poids » carbone de l'avion dans les émissions françaises varie du simple au décuple.

²⁷ RAPPORT SPÉCIAL DU GIEC SUR L'AVIATION ET L'ATMOSPHERE PLANÉTAIRE, 1999 (Voir également les travaux de Bernd Kärcher).

²⁸ Grewe et al 2019, The contribution of aviation NO x emissions to climate change: are we ignoring methodological flaws?

Approche retenue	Émissions de GES du secteur aérien	Émissions de GES nationales	Poids du secteur aérien
Inventaire national des émissions de GES français (uniquement les vols intérieurs, prise en compte du CO2 en vol)	5 Mt CO2e	445 Mt CO2e	1,2%
Inventaire national des émissions de GES français, tous GES confondus	11 Mt CO2e	451 Mt CO2e	2,4%
Inventaire national avec prise en compte de la moitié des vols internationaux, CO2 en vol uniquement	22,7 Mt CO2e	463 Mt CO2e	4,9%
Inventaire national avec prise en compte de la moitié des vols internationaux, tous GES	50 Mt CO2e	490 Mt CO2e	10,2%
Inventaire national avec prise en compte de 100% des vols au départ ou à destination de la France, tous GES	88 Mt CO2e	532 Mt CO2e	16,5%
Empreinte carbone de l'aviation, uniquement CO2 en vol	25,6 Mt CO2e	749 Mt CO2e	3,4%
Empreinte carbone de l'aviation, tous GES confondus	56,2 Mt CO2e	775 Mt CO2e	7,3%

Ainsi, pour la partie vol uniquement (et sans l'aviation privée), la part de l'aviation dans nos émissions de GES peut être considérée entre 1,2% et 16,5% de nos émissions.

La valeur qui nous semble la plus cohérente est la dernière, soit 7,3% de nos émissions²⁹.

Enfin, la particularité du secteur aérien est de condenser les émissions sur un faible temps. Contrairement aux déplacements en voiture des particuliers (11% de l'empreinte carbone des Français) qui sont réalisés au quotidien ou presque, les vols en avion émettent beaucoup sur une durée très courte. Ainsi, pour un individu moyen, un trajet en voiture représentera environ 0,04% de son empreinte carbone (mais il en fera beaucoup dans une année) tandis qu'un trajet en avion représentera de l'ordre de 3% de son empreinte carbone, générée en quelques heures seulement (et il en fera beaucoup moins dans une année). Cela confère une place assez particulière à l'aviation, qui fait partie des rares activités grand public où il est possible d'émettre plus d'une tonne de CO2e en moins de 24h.

²⁹ Donnée certainement sous-évaluée car il est probable qu'il y ait plus de français qui volent hors de France que d'étrangers qui volent en France. D'une part, parce qu'il y a plus de Français qui partent que d'étrangers qui arrivent et d'autre part, les distances que peut faire un étranger en France sont beaucoup plus faibles que celles que peut faire un Français à l'étranger, aux USA par exemple

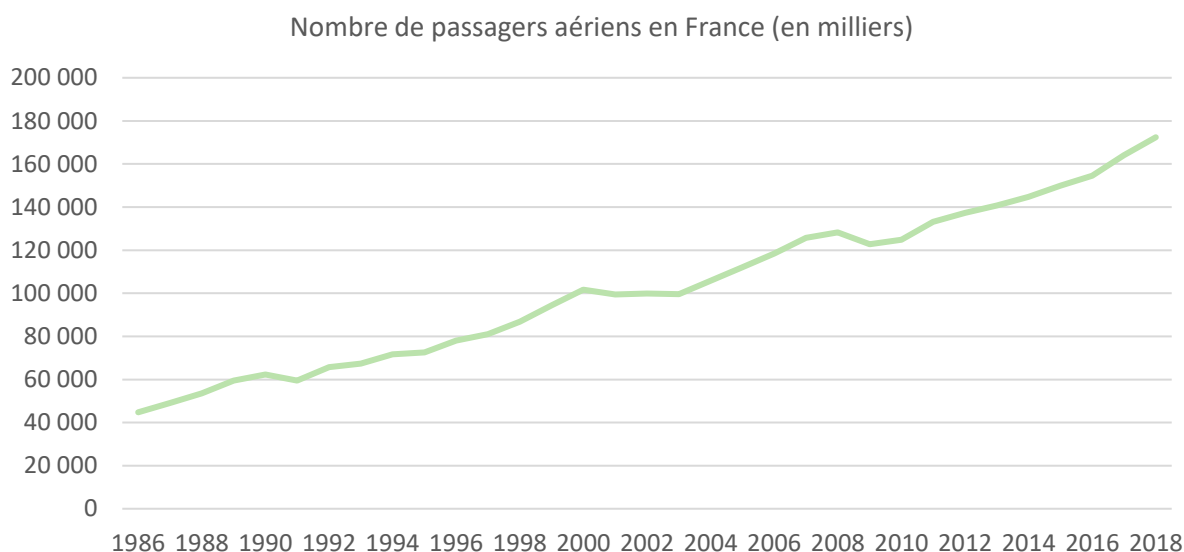
III. Les tendances actuelles

III.1. Un secteur dont la croissance accélère

En 2018, le trafic aérien a augmenté de 5%, en France. Cette donnée conjoncturelle montre que, loin d'atteindre un plateau, l'augmentation du trafic aérien s'accélère. **Entre 2016 et 2018, il y a eu 18 millions de passagers aériens supplémentaires en France, soit une croissance de plus de 10% en 2 ans.**

En tendance plus longue, l'Union des Aéroports Français précise que la croissance moyenne des passagers (2008-2018) était de 2,7% Métropole et outre-mer, l'année 2018 a donc connu une augmentation conséquente du nombre de passagers.³⁰

Cette tendance a été confirmée sur un temps plus long : « S'agissant de la France métropolitaine, le trafic a connu une croissance annuelle moyenne de 2,7 % entre 2000 et 2015 pour atteindre 145 millions de passagers. »³¹



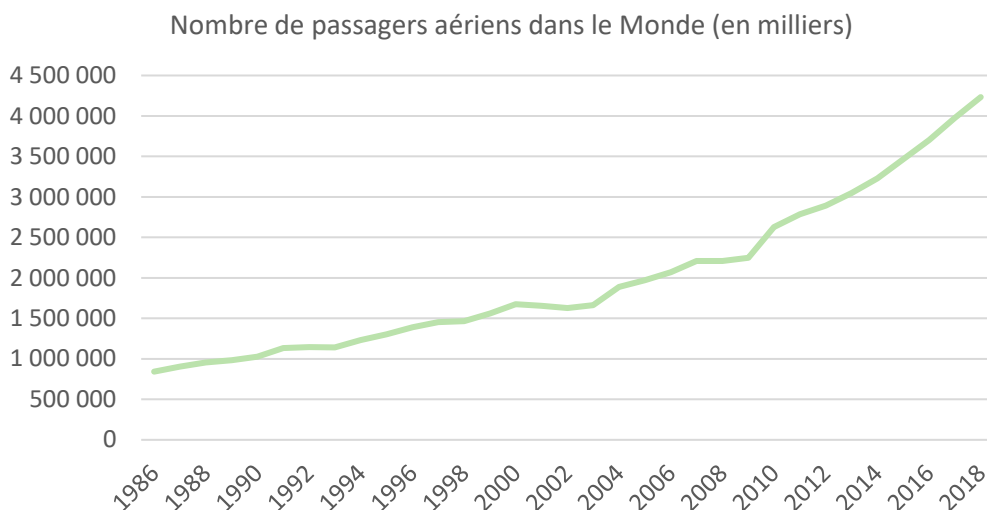
Sources : *Bulletins statistiques des années 1986 à 2018, Direction Générale de l'Aviation Civile, Ministère de la transition écologique et solidaire.*

Au niveau français, nous sommes donc sur une croissance relativement linéaire qui subit les faits d'actualité (attentats de 2001, crise de 2008...), avec une croissance de l'ordre de 3,6 millions de passagers supplémentaires chaque année entre 1986 et 2016.

Au niveau mondial, l'augmentation du nombre de passagers aériens suit une courbe exponentielle, avec un doublement du nombre de passagers aériens tous les 14 ans environ.

³⁰ Résultats d'activité des aéroports français 2018

³¹ Observatoire de l'Aviation civile - Édition 2016, Ministère de la transition écologique et solidaire, page 34



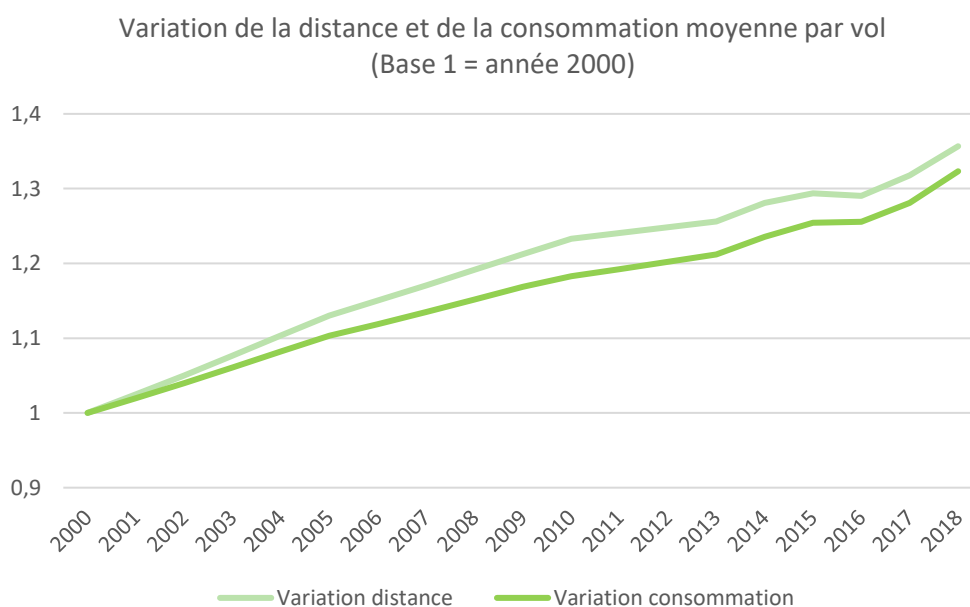
Sources : [données de la Banque Mondiale](#)

III.2. De multiples paramètres à prendre en compte

L'évolution du nombre de passagers aériens est une donnée intéressante, mais qui ne suffit néanmoins pas à comprendre l'évolution de ce secteur, en particulier en matière d'émissions de gaz à effet de serre. Il convient donc de s'intéresser également aux évolutions de l'emport moyen qui, associé au nombre de passagers, détermine le nombre de mouvements aériens. La consommation moyenne de carburant par les avions est un autre paramètre à prendre en compte. Celui-ci est déterminé par la distance parcourue ainsi que par l'intensité carbone du carburant utilisé.

Afin de déterminer la place de ces différents facteurs dans les émissions observées depuis 2000, nous avons repris les données pour les 12 aéroports français accueillant le plus de passagers et représentant 88% du trafic national. Il s'agit des aéroports de Paris Charles de Gaulle, Paris Orly, Nice, Lyon, Marseille, Toulouse, Bâle, Bordeaux, Nantes, Beauvais, Lille et Montpellier.

Il en ressort une corrélation évidente entre la distance parcourue et la consommation de carburant.



Parmi les facteurs influençant la consommation de carburant et donc les émissions de GES d'un vol, le premier déterminant est la variation de la distance. Or, sur les 20 dernières années, la différence de variation entre la distance et la consommation moyenne est très faible. Cette différence de 0,1% par an, qui correspond à l'écart entre les deux courbes sur le graphique ci-dessus, caractérise le gain d'efficacité réel par vol.

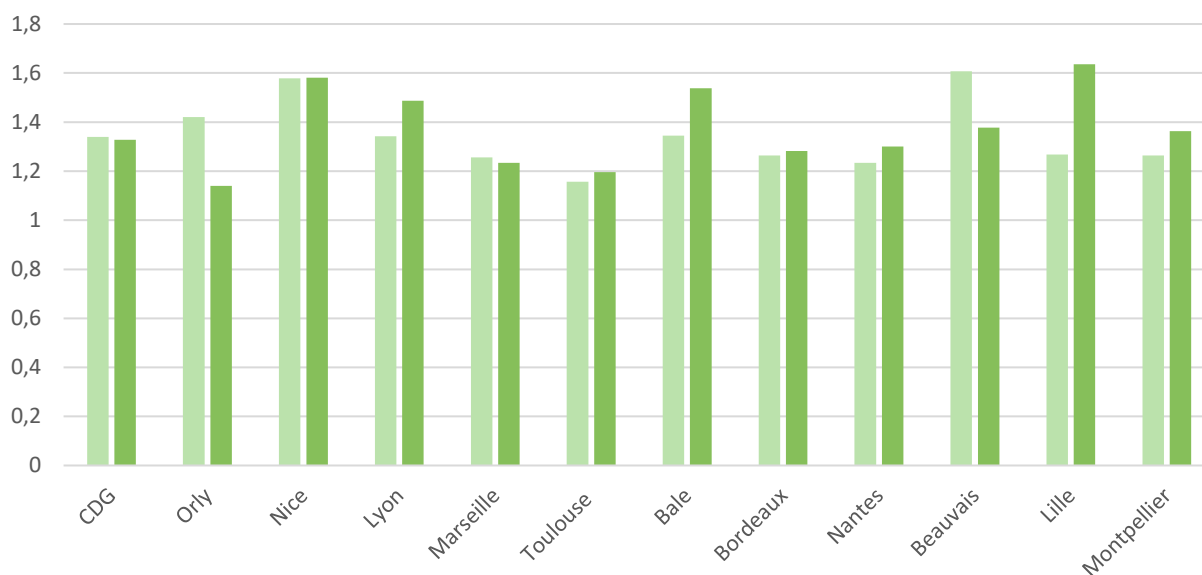
C'est-à-dire qu'il cumule un ensemble de facteurs ayant un impact positif ou négatif sur les consommations. Parmi ceux-ci nous pouvons lister d'un côté les progrès techniques réalisés qui viennent diminuer la consommation de carburant par km parcouru mais qui semblent plafonner ; des évolutions dans les plans de vols (avec des vols plus longs, la forte consommation au décollage est lissée sur une distance plus importante), et d'un autre un changement de flotte pour des avions plus lourds et donc plus consommateur.

Ainsi, il n'y a pas de tendance naturelle à l'infléchissement des émissions de GES du secteur aérien. Le premier vecteur d'efficacité du secteur aérien est depuis 20 ans l'augmentation de l'emport moyen, jouant notamment sur un faible taux de remplissage au début des années 2000 qui s'est nettement amélioré depuis (passant de 64% à 84%).

En outre, les progrès techniques en termes d'aérodynamisme et de motorisation se sont accompagnés d'une augmentation de la taille moyenne des aéronefs. Ces nouveaux avions sont donc de plus en plus émetteurs et ce malgré les améliorations en termes de consommation de carburant. Nous retrouvons ce même paradoxe pour les voitures dont l'efficacité énergétique a été largement améliorée mais l'augmentation du poids des véhicules (avec l'arrivée des SUV) a annihilé les progrès de consommation attendus. Les émissions n'ont donc pas baissé malgré le progrès technique.

De même, on remarque que la consommation moyenne augmente plus que la distance dans certains aéroports. Ceci s'explique par le fait que certains des « petits » aéroports ont connu une augmentation de l'emport moyen très rapide nécessitant un changement de flotte pour des aéronefs plus grands et donc, plus consommateurs de kérosène. Cela se confirme pour les aéroports dont l'emport moyen a connu une hausse brutale à l'instar de l'aéroport de Lyon Saint-Exupéry dont l'emport moyen est passé de 52 (en 2000) à 106 (en 2018). Les émissions moyennes par mouvement ont augmenté de 49% sur la même période alors que les distances moyennes n'ont augmenté « que » de 34%.

Variation de la distance et de la consommation moyenne par vol entre 2000 et 2018



Pour les aéroports de Beauvais et Orly, la consommation moyenne par mouvement n'augmente pas proportionnellement à la distance de vol. Cette différence s'expliquerait par une addition de critères comme le fait que la ligne Toulouse-Orly ait intégré une très légère part de biocarburants (10%), que l'éco-pilotage et l'éco-roulage aient été l'objet d'une attention particulière ou que la part des vols low cost ayant explosé récemment ait entraîné un achat de flotte de dernière génération. Les deux dernières années montrent cependant que l'augmentation de la consommation est redevenue proportionnelle à l'augmentation de la distance de vol, ce qui suggère que les réductions d'émissions attendues par ces méthodes ont montré leurs limites.

A partir de ces données, les prévisions d'émissions totales s'obtiendraient en prolongeant les variations de la distance moyenne, afin de déterminer la consommation en kérozène des avions (le tout pondéré afin de reproduire le « progrès technique » déjà observé entre 2000 et 2018) et en multipliant la consommation unitaire par le nombre de mouvements.

III.3. Pour les 20 prochaines années, le secteur aérien envisage une croissance soutenue

Les projections pour les prochaines décennies penchent vers une augmentation du nombre de passagers très importante pour le monde, fortement tirée par l'Asie et un peu plus modérée pour l'Europe (de l'ordre de 3,5% par an dans le monde et 2% par an pour l'Europe environ).³²

Les pays pour lesquels l'augmentation projetée est la plus importante en termes de passagers supplémentaires, pour la période de 2017 à 2037 (selon le scénario de politique constante) sont les suivants :

- Chine : 1 milliard de nouveaux passagers, pour un total de 1,6 milliard (+167%)
- États-Unis : 481 millions de nouveaux passagers pour un total de 1,3 milliard (+59%)
- Inde : 414 millions de nouveaux passagers pour un total de 572 millions (+262%)
- Indonésie : 282 millions de nouveaux passagers pour un total de 411 millions (+219%)
- Thaïlande : 116 millions de nouveaux passagers pour un total de 214 millions (+118%)

L'IATA estime qu'au regard des tendances actuelles, le nombre de passagers annuels dans le monde pourrait doubler d'ici 2037 pour atteindre 8,2 milliards en comptant un taux de croissance annuel composé (TCAC) de 3,5% pour les deux prochaines décennies. Ce taux serait plus faible que l'évolution des deux dernières décennies (5%). L'IATA table donc sur un rythme qui se ralentit mais une croissance qui reste tout de même soutenue. A noter que le projet européen SESAR vise à pouvoir tripler les capacités de l'espace aérien européen, ce qui ne laisse guère de doute quant aux projections faites sur le continent Européen.

Au niveau français, l'évolution du nombre de passagers annuels suit une augmentation moyenne de 2,7% par an depuis une vingtaine d'années. Alors que les prévisions au niveau mondial sont à un ralentissement de la croissance, les projections françaises tablent sur un maintien de la croissance.

Ce maintien est notamment annoncé par le groupe Aéroports De Paris dans son dossier d'autorisation environnementale relatif à la construction du terminal 4 de l'aéroport de Paris-Charles de Gaulle, qui précise : « *Le trafic des aéroports parisiens a augmenté en moyenne de 2,4 % par an ces 15 dernières années. Sur les 20 prochaines années, les estimations de croissance du trafic parisien s'établissent entre +2 % et +3 % par an, avec une perspective de croissance similaire à Paris-Charles de Gaulle. Ces perspectives conduisent à un trafic passagers de l'ordre de 107 à 126 millions à l'horizon 2037 sur Paris-Charles de Gaulle, et environ 633 000 mouvements d'avions (c'est-à-dire atterrissage et décollage)* ». ³³

Les tendances observées ainsi que les perspectives de développement des différents acteurs du secteur conduisent à retenir un scénario de +2,7% d'augmentation du nombre de passagers annuels pour l'aviation civile française. Cependant, si on excepte les années 2017 et 2018, l'augmentation du nombre de passagers annuels est environ 2 fois plus faible en France qu'au niveau mondial. Au regard des projections mondiales, les projections françaises semblent donc légèrement surévaluées.

III.4. Des projections qui ne prennent pas en compte tous les paramètres

Les projections d'évolution du trafic utilisées par l'IATA se basent sur un rapport de Boeing.³⁴ Ces prévisions de croissances reposent sur une approche dite « top-down, bottom-up » où sont comparées une augmentation de la demande potentielle (top-down) et la capacité du secteur à répondre à cette demande (bottom-up).

³² Communiqué n°62, Association International du transport Aérien (IATA), Octobre 2018

³³ GROUPE ADP – AEROPORT PARIS-CHARLES DE GAULLE DOSSIER D'AUTORISATION ENVIRONNEMENTALE N°4 – VOLET E - ÉTUDE D'IMPACT, 3.5.5.1

³⁴ <https://www.boeing.com/commercial/market/commercial-market-outlook/>

Les prévisions d'augmentation de la demande reposent essentiellement sur des facteurs macroéconomiques en dehors de toute considération d'un besoin de déplacement. Les facteurs principalement pris en compte pour évaluer la demande sont :

- Les variations du PIB national et régional
- Le revenu moyen par habitant
- La composition des forces de travail
- L'état des échanges internationaux et des investissements

En résumé, l'évaluation de la demande potentielle se limite à compter l'augmentation du nombre de personnes qui ont les moyens de prendre l'avion, c'est-à-dire à la fois la population des pays développés et la classe moyenne des pays en développement.

De manière générale, les projections d'évolution du trafic sont effectuées en prolongeant la règle empirique des années précédentes : lorsque le PIB d'un pays augmente de 1 %, la consommation de transport aérien dans ce pays croît également de 1,5 à 2 % selon le niveau de développement du pays.

Or, toujours selon le rapport de Boeing, dans les pays développés, les besoins essentiels sont déjà couverts. Dans ces pays, le temps disponible pour les vacances, la confiance et le portefeuille des consommateurs, le niveau de service et son prix tendent à avoir un impact plus important sur la demande de déplacement aérien. Pour autant, les projections d'évolution du trafic aérien semblent ne pas prendre en compte ces facteurs. Il est donc probable que des facteurs sociaux prennent le pas sur les logiques économiques, ce qui limite la confiance qu'il est possible d'accorder à ces projections.

III.5. L'existence d'un plafond naturel du nombre de déplacements est peu probable

En 2018, le nombre de passagers s'élevait en France à 172,4 millions, soit, au regard de la population française (67 millions), 2,57 fois le nombre d'habitants. Peut-il y avoir une sorte de plafonnement de la demande lorsqu'un certain nombre de vols réalisés par rapport au nombre d'habitants serait atteint ?

Le pays européen pour lequel la consommation d'avion est la plus importante est la Suède, qui l'emporte haut la main avec un nombre de vols de 4,2 fois le nombre d'habitants. Or, entre 2012 et 2017, l'augmentation annuelle du nombre de passagers était d'environ 5,9%. Ce taux de croissance reste supérieur à celui connu en France sur la même période. Cela tend à confirmer que s'il existe véritablement un plafonnement de la demande de voyages en avion, celui-ci se situe bien au-delà des niveaux que nous connaissons aujourd'hui.

En revanche, il est intéressant de noter que la demande en Suède a brusquement chuté en 2018 et surtout en 2019. Nous pouvons rattacher cette diminution du nombre de vols à un phénomène d'origine sociologique, voire politique : le « Flygskam » (honte de prendre l'avion).

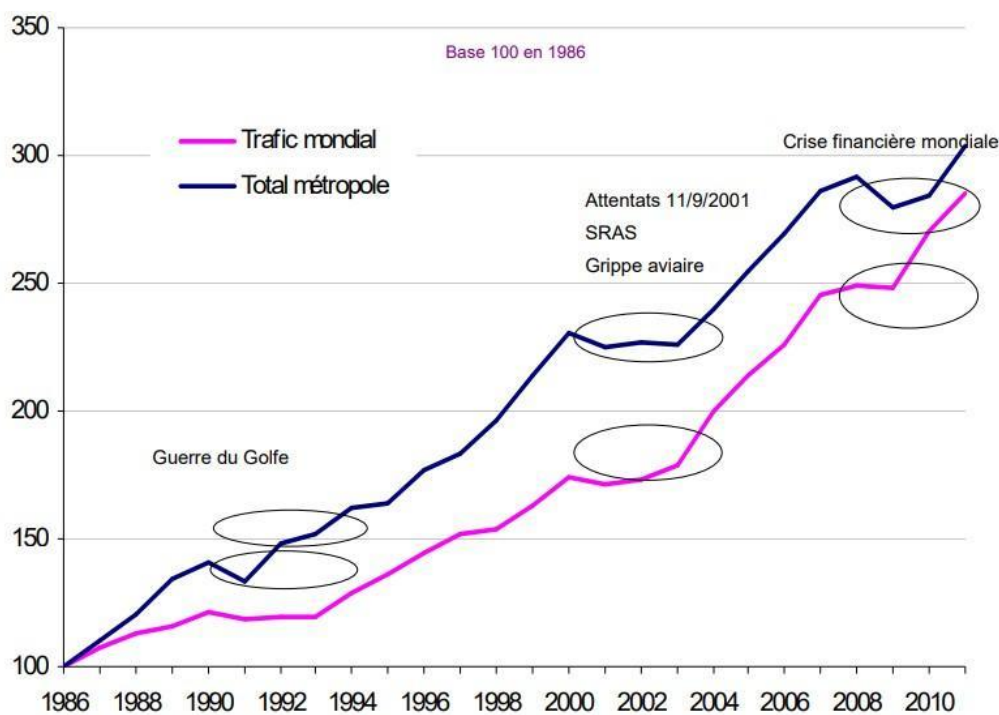
Une publication de la Chaire Pégase parue en février 2020 précise en ce sens :

« Si les premiers tweets utilisant le hashtag #flygskam datent de Novembre 2017, son usage sur les réseaux sociaux s'est essentiellement développé pendant l'année 2019 avec un pic d'activité entre juillet et septembre. Le #flygskam a principalement été utilisé dans des pays développés, et sans surprise, les comptes suédois ont joué un rôle central dans sa diffusion. »

« A première vue, le flygskam semble en effet avoir un impact sur les perceptions et comportements des consommateurs. Selon une étude de la banque Suisse (UBS), réalisée sur 6000 personnes de différents pays (États-Unis, Allemagne, France, Royaume-Uni), près de 22% des personnes interrogées ont déclaré avoir réduit leur nombre de vols (ou avoir évité de prendre l'avion) pour des raisons environnementales durant l'année 2019. En termes de trafic, l'impact semble se faire ressentir essentiellement sur les vols domestiques (car plus facilement substituables par un trajet en train ou en voiture). Nous observons par exemple sur cette période que les vols intérieurs en Suède ont diminué de 3,6% pour l'année 2018 et 9% pour l'année 2019. L'Allemagne, qui suit le modèle Suédois, a pu observer une baisse de 8,6% des vols intérieurs au dernier trimestre de l'année 2019. A l'inverse, en France, le flygskam ne semble pas avoir eu de véritable impact sur le trafic aérien intérieur qui a augmenté de 2,4% entre 2018 et 2019. Il semblerait donc que l'effet du flygskam sur le trafic aérien (et en particulier le trafic domestique) ne soit pas très net et dépende des pays. Par ailleurs, en cas de baisse du

trafic domestique, il n'est pas certain que l'évolution soit imputable au flygskam car d'autres facteurs peuvent expliquer ces variations (contexte géopolitique, évolution du paysage concurrentiel, faillite de compagnies aériennes, etc.). »³⁵

Un phénomène d'origine politique et sociologique semble donc à même d'influencer la demande de vols. Bien que pour le flygskam, il soit encore trop tôt pour affirmer que la demande ait été durablement réduite, d'autres phénomènes ayant eu un impact sur le trafic aérien ont déjà montré par le passé qu'il ne s'agissait que d'une rupture de court terme, n'influençant pas, ou très peu, la tendance générale observée. Concernant les attentats du 11 septembre 2001 par exemple, selon l'OACI, « l'année 2001 s'est terminée avec un déclin de 2,9 % du trafic de passagers et les deux années suivantes ont été marquées par la stagnation de la demande avec des taux de croissance de 0,4 % en 2002 et de 0,0 % en 2003 »³⁶. Or, cette baisse du trafic aérien n'a été que de très courte durée et n'a pas influencé l'évolution de la croissance du secteur de manière tendancielle. Comme le montre le graphique ci-dessous, l'évolution du trafic aérien mondial connaît des légères perturbations liées à des crises bien que la tendance générale ne soit pas perturbée.



La crise du COVID-19 a elle aussi frappé de plein fouet l'aviation civile mais il est tout aussi difficile de dire si les impacts de la crise auront des effets sur le long terme. En effet, nombreux sont les Etats qui ont volé au secours des compagnies aériennes en cas de crise et les contreparties environnementales sont ridiculement faibles par rapport à l'effort à fournir pour réduire véritablement l'impact écologique du secteur. En revanche, il est clair que les entreprises ont été contraintes de limiter leurs déplacements pendant le confinement et ont également dû mettre en place des moyens dématérialisés de communiquer avec leurs interlocuteurs. Ainsi, certaines entreprises ont été contraintes de trouver dans la précipitation des moyens de continuer à exercer dans la mesure du possible leurs activités, sans prendre l'avion. Cette crise du COVID-19 a permis aux entreprises de développer des nouveaux outils et procédés permettant de réaliser leurs activités à distance. Maintenant que ces changements ont été testés, on peut très bien imaginer que tout ou partie de ces méthodes vont se pérenniser en dépit des réouvertures de lignes aériennes. **Ces nouveaux modes d'organisation pourraient avoir un impact structurel sur le secteur aérien.**

³⁵ Chaire Pégase, Les Français et l'impact environnemental du transport aérien : entre mythes et réalités, février 2020, page 9

³⁶ Jacques Roy, « Transport aérien : Risques, turbulences et métamorphoses », Téoros, 23-1 | 2004, 45-51

³⁷ Direction Générale de l'Aviation Civile (DGAC), Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'Énergie, Le profil du passager aérien en France, 2013

III.6. La capacité du secteur à répondre à la demande reste hasardeuse

La capacité du secteur à répondre à la demande est évaluée par l'IATA en fonction des paramètres suivants :

- L'augmentation des accords internationaux
- La libéralisation du marché
- L'arrivée de nouvelles technologies aériennes
- Le déploiement de nouveaux business-model (ex : les vols Low-Cost)
- Les améliorations du réseau aérien et des infrastructures

Ces paramètres parlent d'eux-mêmes et parient sur de nouvelles possibilités qui ne sont pas toutes démontrées, ainsi que sur un assouplissement d'un marché déjà très libre. D'autres éléments ayant un impact négatif ne sont pas pris en compte comme la rentabilité du secteur, la dépendance au pétrole ou l'adaptation au changement climatique.

Si le nombre de passagers ne cesse d'augmenter, les profits des compagnies aériennes ne sont pas pour autant élevés. Une forte pression concurrentielle conjuguée à une forte volatilité du cours des matières premières en font l'un des secteurs les moins rentables.

Or, si la situation économique actuelle des entreprises aériennes semblait s'améliorer avant la crise sanitaire, elle reste essentiellement conjoncturelle. De nombreuses compagnies ont fait ou risquent de faire faillite avec la crise sanitaire. Une augmentation significative du prix du baril de pétrole pourrait amener de nombreuses autres compagnies à la faillite ou pourrait replonger dans le rouge les plus gros acteurs, le prix du kérosène restant un déterminant majeur de la rentabilité du secteur aérien.

Les marchés en forte croissance sont également ceux qui seront le plus impactés par le dérèglement climatique : Afrique, Asie, Moyen-Orient. Ces régions seront soumises à des défis d'adaptation importants pour les infrastructures et les conditions de vols, les approches ou les manœuvres au sol. Ces impacts potentiels du changement climatique ne sont pas, ou très peu, pris en compte dans les projections de croissance du secteur aérien.

IV. Pistes de réduction des émissions de CO2 de l'aviation

IV.1. Un choix d'indicateurs qui peut induire en erreur

Il est fréquent de caractériser l'impact en termes d'émissions de GES de l'aviation par des données en CO2 par passager-kilomètre. Cette mesure a le mérite d'être simple et de pouvoir caractériser assez facilement l'efficacité du secteur aérien pour une unité donnée. Il faut tout de même garder à l'esprit qu'elle occulte généralement les émissions autres que le CO2 et en particulier les traînées de condensation, dont le forçage radiatif est égal à celui du CO2.

Par ailleurs, cet indicateur crée la fausse impression que les émissions baissent à mesure que le nombre de passagers augmente. Or, si l'efficacité est bien réelle, tout comme elle l'est pour le covoiturage, cela ne permet pas de conclure sur la tendance des émissions du secteur. D'une part, la quantité de vols augmente ainsi que leur distance et d'autre part, le taux de remplissage des avions ne peut pas dépasser 100%. Cela paraît évident à dire, mais en prolongeant la tendance à la baisse des émissions par passager kilomètre sans s'intéresser aux causes de cette baisse, on peut se retrouver à supposer un taux de remplissage à venir supérieur à 100%.

Si une amélioration véritable de l'efficacité énergétique des aéronefs existe bel et bien, et qu'il y a une tendance à réduire les émissions par passager kilomètre, cet indicateur ne peut être considéré comme l'alpha et l'oméga.

Dans la suite de ce chapitre, nous passons en revue les différentes possibilités de réduire les émissions de GES de l'aviation. Ces différents leviers nous permettront ensuite de dresser des scénarios d'évolution des émissions de GES pour les décennies à venir.

IV.2. Augmenter l'emport moyen

Une première piste qui permet d'augmenter l'efficacité des vols par passager est de maximiser le taux de remplissage des avions. Cela se caractérise par l'augmentation de l'emport moyen.

Sur ces dernières années, l'emport moyen en France est passé de 95 à 150 passagers équivalent, soit une augmentation conséquente de 58%.

L'augmentation de l'emport moyen en France a montré qu'elle pouvait avoir comme effet de diminuer le nombre de mouvements nécessaires pour transporter une quantité donnée de voyageurs. Des émissions supplémentaires ont ainsi pu être évitées, même si une diminution du nombre de mouvements n'a pas permis de diminuer les émissions globales de CO2 de l'aviation civile. Les émissions ont continué de croître car, en parallèle, les distances moyennes de vol ont continué d'augmenter.

Le paramètre seul d'emport moyen, plus utilisé que le taux de remplissage des avions, ne caractérise pas la flotte qui est utilisée. Or **l'augmentation de l'emport moyen entraîne à terme un changement de flotte pour des avions plus grands, plus lourds, et donc, plus émetteurs de CO2.**

La modification de l'emport moyen de la flotte a donc un effet pallier sur les émissions. Lors du changement de flotte, les émissions par mouvement sont bien supérieures, même si, à terme, avec un taux de remplissage plus important, on peut estimer que des émissions seront évitées dans la mesure où certains mouvements n'auront pas lieu.

Afin d'optimiser l'emport moyen des avions, certaines mesures relativement simples peuvent être mises en place. La suppression des Premières et Business Class a pour effet d'augmenter les capacités d'emport des avions.

Par exemple, sur un Airbus A330-300, sur les 9 rangées de sièges-lits (première classe) comportant 34 places, l'équivalent de 166 sièges standards peuvent être installés, soit 132 places supplémentaires. L'Airbus A330 comportant aujourd'hui 293 places, cela lui permettrait d'embarquer 425 personnes à son bord. Ainsi, pour transporter 100 000 passagers, il faudrait 341 avions avec une première classe contre seulement 235 si cet espace était composé de sièges standards. 106 mouvements seraient ainsi évités tous les 100 000 passagers.

IV.3. Le roulage « vert » ou Green Taxiing :

Chaque vol commence par une phase plus ou moins longue de « roulage » pour relier les terminaux (ou les aires de stationnement) aux pistes. En 2018, l'ADEME a estimé ce **temps de roulage à 18 minutes** en moyenne au sein des

aéroports sondés.³⁸ Ce roulage est généralement effectué grâce à la puissance des moteurs des avions. Le roulage est donc émetteur de gaz à effet de serre ainsi que de nombreux polluants atmosphériques locaux (SO₂, NO_x, CO, hydrocarbures imbrûlés, particules fines).

Certaines compagnies ont déjà mis en place des « éco-roulages » consistant à n'activer qu'un seul moteur permettant ainsi de diminuer la consommation de kérosène pour cette phase. La pratique de l'éco-roulage permettrait d'économiser jusqu'à 50% de carburant sur cette phase au sol.³⁹

D'autres compagnies envisagent une traction électrique via des moteurs intégrés dans les trains d'atterrissage (alourdissant cependant l'appareil) voire avec un véhicule annexe.

Concernant ces pratiques de roulage-économe, la Direction Générale de l'Aviation Civile précise à travers son Service Technique que :

« En termes de consommations et d'émissions, le bilan est nettement positif. Cependant, il faut noter que même si l'ensemble des avions de la famille A320 étaient équipés (soit 42 % des vols), seuls 10 % de la consommation totale de carburant au roulage seraient économisés (environ 20 tonnes par jour).

Ce phénomène s'explique par le fait qu'il existe des durées de fonctionnement minimales avant de pouvoir utiliser les réacteurs au régime de décollage et le roulage n'est donc pas intégralement effectué moteurs éteints. De plus, pendant la partie du roulage où les moteurs ne fonctionnent pas, les avions doivent utiliser leur APU (Auxiliary Power Unit, groupe auxiliaire de puissance embarqué), donc brûler du carburant, afin de produire les énergies électrique, pneumatique et hydraulique nécessaires au fonctionnement de l'avion. »⁴⁰

Les émissions évitées lors des phases de roulage restent malgré tout relativement faibles au regard de leur place dans les émissions totales imputables au trafic d'un aéroport. Par exemple concernant Roissy Charles de Gaulle, ces émissions étaient de l'ordre de 3% du total émis par les avions.

IV.4. Optimiser les trajets

Il y a deux façons d'optimiser les trajets en avion :

Optimiser les trajectoires de vol

En adoptant une trajectoire plus directe et dont les changements d'altitude seraient plus progressifs, une diminution de la consommation des aéronefs peut être attendue. Le « Cost Index » permet de mesurer l'optimisation de la trajectoire au regard des dépenses de carburant. Le Shift Project nous rappelle en ce sens que l'indicateur « horizontal flight efficiency – KEA », qui mesure l'écart entre la trajectoire observée et la trajectoire idéale, ne diminue plus significativement⁴¹. De plus, il s'agit déjà d'une démarche entreprise par les compagnies aériennes. **La marge de progrès est donc dorénavant très faible.**

Un changement de l'altitude de vol pour certains mouvements permettrait cependant de limiter l'impact des traînées de condensation. En effet, seuls 2 à 2,5% des mouvements seraient responsables de 80% de la nébulosité induite par le passage d'un aéronef.⁴² Il s'agirait donc de modifier l'altitude de vol pour éviter la zone de formation de ces traînées.

³⁸ ADEME, Bilan national du programme d'actions des aérodromes, 2018

³⁹ Koudis, G., Stettler, M., Hu, S. J., Majumdar, A., & Ochieng, W. Y, The impact of single engine taxiing on aircraft fuel consumption and pollutant emissions, The Aeronautical Journal, 122, 2018

⁴⁰ Direction générale de l'Aviation civile (DGAC), Service technique de l'Aviation civile (STAC), Le roulage « vert » sur les grandes plates-formes aéroportuaires, Juillet 2012

⁴¹ SHIFT PROJECT, Crise(s), climat : préparer l'avenir de l'aviation, mai 2020

⁴² Mitigating the Climate Forcing of Aircraft Contrails by Small-Scale Diversions and Technology Adoption, Roger Teoh, Ulrich Schumann, Arnab Majumdar, and Marc E. J. Stettler, Environmental Science & Technology 2020 54 (5), 2941-2950

Pour rappel, celles-ci se forment lorsque l'atmosphère est suffisamment froide et humide. On situe cette zone entre 8 000 et 12 000 m d'altitude. Voler plus ou moins haut permettrait alors d'éviter ces impacts hors CO₂.

Une étude démontra qu'en modifiant de 600 m l'altitude de seulement 1,7 % des vols, on obtient une diminution du forçage radiatif de la nébulosité induite par les aéronefs de 59,3% en moyenne.⁴³ En été, il s'agirait de voler plus bas afin de retrouver facilement une température trop élevée pour que les traînées se forment. A l'inverse, en hiver il serait plus facile de voler plus haut.

Ces changements d'altitude de vol peuvent entraîner une augmentation de la consommation de kérosène de l'ordre de 5% pour certains vols⁴⁴. Ainsi, en augmentant de 5% la consommation de 1,7% des vols, on obtiendrait une diminution de 60% des traînées et cirrus. **Pour la France, si on estime que 1,7% des vols émettent 15% du CO₂ du secteur de l'aviation, modifier leurs altitudes de vol entraînerait une augmentation des émissions totales de CO₂ ainsi qu'une augmentation de la consommation globale de kérosène de 0,75% pour une diminution de 30% de l'impact climatique imputable à l'aviation civile** (en comptant le CO₂ émis en vol ainsi que les effets liés à la nébulosité induite).

Optimiser les destinations de vols

Il est fréquent pour les passagers aériens de décomposer leur trajet en plusieurs étapes n'ayant parfois pas beaucoup de sens au regard de l'itinéraire visé. Par exemple, il est fréquent de Faire un Paris – Genève puis un Genève – Madrid. Le passage par Genève rallonge alors énormément le temps de trajet ainsi que les émissions de GES, notamment car il nécessite deux phases de décollages qui sont les phases les plus consommatrices de kérosène. Une réorganisation des lignes aériennes pourrait éventuellement permettre de limiter certains trajets superflus. Le projet de Ciel unique européen « SESAR » serait une excellente opportunité de réorganiser le maillage de lignes aériennes qui recouvre l'Europe. Cependant cette réorganisation ne semble pas figurer parmi les objectifs du programme.

IV.5. Les limites de l'efficacité bientôt atteintes

La technologie aéronautique a montré qu'elle était capable d'avancées majeures en termes de légèreté et robustesse des matériaux utilisés, de coefficient de pénétration dans l'air ainsi que de systèmes de turbopropulseurs. Bien que ces avancées aient été fondamentales dans le secteur, les progrès technologiques semblent confrontés à un plafond de verre.

Le Shift Project dans son rapport⁴⁵ analyse la marge de progression attendue par une amélioration technologique des aéronefs, notamment concernant la performance des 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 venir. 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. »

L'aviation se doit de respecter les lois de la physique (faire décoller une masse et la maintenir en l'air) ce qui nécessite une certaine quantité d'énergie. S'il est possible d'optimiser la masse de l'aviation, sa portance ou le cycle de combustion du carburant qu'il transporte, des limites physiques existent et ne peuvent être dépassées que par des ruptures industrielles majeures.

Si les progrès techniques semblent se confronter à une asymptote aujourd'hui, il faut dans tous les cas prendre en compte le temps nécessaire à une innovation pour se répandre dans tout le parc aérien. En prenant en compte les temps de développement et de tests de sécurité (quelques années) puis les temps de renouvellement de la flotte (durée de vie

⁴³ Ibid

⁴⁴ Ibid

⁴⁵ SHIFT PROJECT, Crise(s), climat : préparer l'avenir de l'aviation, mai 2020

utile moyenne de 18 ans), il faut au mieux 25 ans pour que le parc volant soit intégralement équipé de ces nouvelles technologies.

Actuellement, la croissance extrêmement rapide du nombre de passagers vient annihiler les progrès techniques réalisés. En effet, ce rythme impose d'augmenter soit le nombre de mouvements, soit les capacités d'emport des avions pour répondre à cette demande. On se retrouve alors avec une multiplication des vols ainsi qu'une augmentation du poids et de la taille des appareils entraînant de fait une consommation plus importante.

IV.6. Changer le carburant, les nouveaux carburants possibles

L'avion électrique

Cette technologie relève aujourd'hui du fantasme pour une demande aussi importante. Certaines expérimentations ont permis de faire des vols de très courte distance avec une capacité d'emport très réduite. Le Pipistrel Alpha Electro permet ainsi de voler pendant 1h et d'emporter 2 personnes. **Cette technologie ne semble pas adaptée à l'aviation civile**, même si certaines compagnies annoncent des projets de recherche vers l'aviation électrique. Easy Jet aux côtés de Wright Electric a annoncé travailler sur un modèle d'avion de 186 places qui serait à même de voler sur des distances d'environ 500 km (environ la distance entre Paris et Bordeaux). L'objectif de premier vol de cet engin avoisine l'année 2030, sous réserve d'une rupture technologique permettant de disposer de batteries beaucoup plus performantes que celles d'aujourd'hui.

Un des problèmes principaux est effectivement lié au poids des batteries nécessaires pour alimenter en énergie un avion. L'ordre de grandeur de l'énergie nécessaire est de 250 Wh/passager-kilomètre. C'est le même ordre de grandeur pour un A350 que pour le Solar Impulse.

Cela signifie que pour emporter 400 passagers sur 15 000 km, il faut emporter l'équivalent de 1 500 MWh, ce qui représente environ 5 000 tonnes de batterie avec les technologies actuelles... soit plus de 10 fois le poids de l'avion. Pour emporter 100 passagers sur 1 000 km, il faudrait 100 tonnes de batterie, autrement dit, il faudrait l'équivalent d'un A350 pour faire un Paris-Nice.

Plus les batteries sont importantes, plus le besoin en énergie est important. Si bien qu'il est inenvisageable de voir un avion de ligne voler directement à l'électricité sans des progrès de rupture conséquent sur les batteries. Or, le temps de développement reste là aussi une contrainte de taille qui rend impossible la vision d'une flotte aérienne essentiellement électrique sur les 30 prochaines années, ni même probablement au cours de ce siècle.

Une autre façon de voler à l'électricité serait d'utiliser un système de pile à combustible fonctionnant à l'énergie hydrogène et restituant de l'énergie sous forme électrique. Ainsi, le poids des batteries serait moins un problème bien que ce mode de déplacement soit encore très loin d'être étendu à des échelles intéressantes pour avoir un réel impact sur les émissions globales du secteur aérien.

Hydrogène

L'avion à hydrogène est techniquement possible. Cependant, l'hydrogène prend beaucoup plus de volume que le kérosène, ce qui implique des difficultés d'approvisionnement et de stockage. Les aéroports devraient ainsi disposer de l'espace de stockage suffisant pour approvisionner les aéronefs en kérosène et en hydrogène. Les molécules de dihydrogène étant particulièrement petites, il arrive qu'elles traversent certains matériaux comme l'acier, c'est pourquoi les réservoirs à hydrogène peuvent être jusqu'à 100 fois plus chers que les réservoirs d'autres gaz.

L'équation économique n'est donc pas encore résolue et, comme pour les autres technologies, un changement de la flotte est nécessaire en vue de stocker des quantités de carburant près de 3 fois supérieures en volume aux quantités de kérosène aujourd'hui utilisées. Nous retrouvons donc la problématique de la durée de vie moyenne des aéronefs (environ 18 ans) qui fait que cette technologie ne pourrait être suffisamment répandue pour devenir significative avant 2050.

En termes d'émissions de GES, l'hydrogène ne permettra pas d'éviter l'intégralité des effets « hors CO2 » bien qu'elle y participe. Plus inquiétant, la très grande majorité (96%) de l'hydrogène fabriquée aujourd'hui l'est par vaporeformage d'hydrocarbures : un procédé extrêmement émissif puisque pour obtenir une tonne d'hydrogène, 10 à 11 tonnes de CO2 sont produites et en général émises dans l'atmosphère. Ainsi, bien que le CO2 ne soit pas émis dans les phases de vol, il l'est en amont. Actuellement, une flotte à l'hydrogène ne serait donc pas moins émettrice de GES qu'une flotte volant au

kérosène, car 1 tonne d'hydrogène contient une quantité d'énergie équivalente à 3 tonnes de kérosène, soit plus ou moins la même quantité de CO2 produite.

Si l'hydrogène a autant le vent en poupe, c'est qu'il est possible d'obtenir de l'hydrogène par électrolyse de l'eau. Ainsi, la production d'hydrogène consomme de l'électricité, ce qui est une grande opportunité d'un point de vue climatique notamment pour la France dont le mix énergétique est décarboné. En revanche, ce procédé est plus onéreux et permet d'obtenir de l'hydrogène pur principalement utilisé dans le domaine de la médecine.

Une démocratisation de l'hydrogène nécessite une production d'électricité importante et supplémentaire à l'usage actuel de l'électricité. Cela nécessiterait d'installer des capacités supplémentaires afin de produire de l'électricité dédiée à l'électrolyse de l'eau, soit en augmentant le parc nucléaire actuel, soit en développant de nouvelles et nombreuses installations de production d'électricité renouvelables. D'autant plus que la production d'hydrogène présente un rendement estimé entre 50 et 60%. Cela signifie que pour obtenir 1 unité d'énergie utile à la propulsion de l'avion, il faudra consommer près de 2 unités d'énergie au total.

Nous touchons là un autre point sensible pour le futur du transport aérien, c'est la concurrence avec d'autres secteurs sur les ressources disponibles. Il ne sera certainement pas possible dans les 20 prochaines années de développer les capacités électriques permettant à la fois de maintenir l'usage de l'électricité que nous avons actuellement dans notre mode de vie et de passer l'ensemble des engins de transports (roulant, volant voire flottant) à l'électrique.

Par exemple la demande en énergie d'un secteur aérien décarboné à l'aide d'hydrogène et de carburants de synthèse, est estimée à 21 000 TWh⁴⁶ en 2050 soit 84 % de l'énergie renouvelable disponible en 2040 selon le meilleur scénario de développement des énergies renouvelables du World Energy Outlook 2019 (25 000 TWh).

Par conséquent, si l'hydrogène gagnait le transport aérien dans les 20 prochaines années, le carburant utilisé viendrait prioritairement du vaporeformage d'hydrocarbures ou remettrait complètement en question l'ensemble des autres usages énergétiques en dehors du secteur aérien.

A noter également qu'aujourd'hui, l'hydrogène n'est étudié que pour le remplacement de l'A320. La technologie n'est pas envisageable, ou du moins pas envisagée, pour les vols long-courriers qui représentent 62 % des émissions de CO2 de la France. Il s'agirait a priori d'une solution de substitution restreinte aux court-courriers.

Biocarburants

Selon les normes en vigueur en France, pour être qualifié comme tel, le carburant final utilisé ne doit pas dépasser 50% des émissions de CO2 produites par la même quantité de kérosène. A noter qu'au niveau international (selon l'OACI), la qualification de biocarburant est plus souple puisque la limite est fixée à 90% des émissions de CO2 du kérosène standard.

La quantité de biocarburants dans les avions est aujourd'hui plafonnée à 50% car ces derniers n'ont pas les mêmes propriétés en matière de lubrification et résistance au froid.

Autrement dit, aujourd'hui, les carburants utilisés dans l'aviation intégrant des biocarburants en contiennent au mieux entre 10% et 50%.

Si l'intégralité des vols observés en 2018 et imputables à l'aviation civile française avaient utilisé des biocarburants à hauteur de 50%, soit le maximum admissible, on aurait obtenu un total de 17 millions de tonnes de CO2 contre 22,7 réellement émises, soit une diminution de 5,7 Mt (=25%). Si on prend également en compte les traînées de condensation sur lesquelles les biocarburants n'ont pas d'impact, nous obtenons 39,7 Mt contre 45,4 Mt réellement émises (baisse de 12,5%).

La fabrication de ces biocarburants peut également s'avérer complexe et consommatrice en énergie ou ressources. C'est le cas notamment des biocarburants de première génération qui entrent directement en concurrence avec la production

⁴⁶ Voir Hydrogen-powered aviation, A fact-based study of hydrogen technology, economics, and climate impact by 2050, May 2020, p.44.

alimentaire en nécessitant des surfaces de terres arables importantes, entraînant par la même occasion une déforestation massive, dont l’empreinte écologique est plus importante que les carburants fossiles.

Les industriels envisagent donc de se tourner vers les biocarburants dits de deuxième génération. Ceux-ci sont produits à partir de déchets agricoles ne rentrant ainsi pas en concurrence directe avec la production alimentaire. La quantité totale de biodéchets permettant de fabriquer ces biocarburants permettrait tout juste d’alimenter le secteur de l’aviation à l’horizon 2045 selon un collectif de scientifiques.⁴⁷ Bien que cette perspective puisse être porteuse d’espoir, il faut rappeler que cette hypothèse suppose de dédier l’intégralité des biodéchets non comestibles à la fabrication de biocarburants. Or, ces mêmes déchets sont utilisés pour la production énergétique à base de biomasse, pour la fabrication de matériaux éco-conçus (permettant notamment de remplacer le plastique ou de faire des matériaux composites en bois), ainsi que de nourrir les terrains agricoles en matière organique. **L’affectation de biomasse à destination de la fabrication de biocarburants pour les avions viendrait donc là aussi en concurrence avec les autres secteurs utilisant déjà ces ressources.**

Kérosène de synthèse

En utilisant le procédé dit « Fischer-Tropsch », il est possible de produire du kérosène à partir de monoxyde de carbone (CO) voire directement à partir du CO₂ présent dans l’atmosphère. Pour ce faire, il s’agit d’utiliser du dihydrogène (H₂) - produit par électrolyse de l’eau afin de ne pas émettre de CO₂ - et à l’aide d’un catalyseur de transformer ainsi le CO ou CO₂ en hydrocarbure.

Cette technologie a l’avantage de pouvoir aspirer le CO₂ directement dans l’air ambiant⁴⁸. Ainsi, le bilan en termes d’émissions de gaz à effet de serre serait nul ou presque puisque le CO₂ émis lors de la combustion de l’hydrocarbure aurait d’abord été prélevé de l’atmosphère.

Dans un premier temps, le kérosène de synthèse pourrait être incorporé dans les carburants actuellement utilisés dans des proportions de 10 à 50% (il pourrait théoriquement être utilisé comme carburant « pur » mais cela nécessiterait des adaptations des moteurs d’avions).

Cette technologie n’en est encore qu’à la phase de démonstrateur et a besoin que le coût carbone soit supérieur à 120€ la tonne pour pouvoir se développer économiquement.

Enfin, cette technologie pose une question de rendement énergétique global. En raison de la multiplication des procédés de transformation successifs, le rendement global du procédé est assez faible (de l’ordre de 20-35% contre 50 à 60 % pour l’utilisation directe de l’hydrogène). Cela signifie que pour obtenir 1 unité d’énergie utile à la propulsion de l’avion à l’aide de carburant de synthèse, il faudra consommer près de 3 à 5 unités d’énergie au total et donc extraire d’autant plus de CO₂.

IV.7. Compenser les émissions, le système CORSIA

Afin de diminuer l’impact du secteur de l’aviation sur le climat, les compagnies aériennes mettent souvent en avant des dispositifs de compensation. L’idée consiste à financer des projets de réduction d’émission ou de séquestration. Par exemple, un de ces projets consisterait à planter des arbres dont la séquestration carbone serait équivalente aux émissions de CO₂ d’une compagnie aérienne. En poussant, l’arbre va ainsi retirer une certaine quantité de CO₂ dans l’atmosphère et il s’agira pour les compagnies de planter autant d’arbres que nécessaire pour que leurs émissions n’aient finalement pas d’impact sur la quantité totale de CO₂ présente dans l’atmosphère.

L’Organisation de l’Aviation Civile Internationale (OACI) est parvenue à un accord sur la compensation des émissions du secteur en 2016 nommé CORSIA (Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation). A partir de janvier

⁴⁷ https://atecopol.hypotheses.org/4062#_edn12

⁴⁸ comme annoncé par la société française Kimhod

2021 sur une base volontaire, puis obligatoire à partir de 2023, les compagnies devront acheter des crédits de compensation carbone pour les émissions supérieures au niveau de 2019. Chacun de ces crédits vaut 1 tonne de CO₂.⁴⁹

Si, sous certaines conditions, notamment en tenant compte des questions de biodiversité, le dispositif CORSIA pourrait avoir quelques avantages environnementaux en recréant des écosystèmes et forêts, cela peut s'avérer trompeur lorsqu'il justifie le développement d'une activité polluante.

En effet, les émissions de CO₂ s'inscrivent dans une temporalité différente de la séquestration. Une tonne de CO₂ sera émise en quelques secondes alors qu'un arbre mettra plusieurs dizaines d'années avant de stocker l'intégralité de la quantité de carbone qu'il a permis à la compagnie aérienne d'émettre. Ceci pose d'importants problèmes, notamment quand il s'agit de limiter le réchauffement climatique à des échéances relativement proches. De plus, les projets de reboisement de forêts par exemple sont potentiellement exposés aux risques d'incendies ou de sécheresse. Lorsqu'un arbre brûle ou se décompose, il ne fait ni plus ni moins que relâcher le CO₂ qu'il avait stocké. La compensation aura donc été temporaire.

Si on prend les émissions françaises que devraient compenser les compagnies aériennes (environ 11 Mt CO₂ pour l'année 2033), cela représente 12,7% du puits de carbone annuel des forêts de France Métropolitaine (aujourd'hui de 87 MtCO₂e/an).⁵⁰ **Il faudrait planter 2,15 millions d'hectares de forêt⁵¹, représentant près de deux fois la région Île-de-France (1,2 millions d'hectares) pour compenser les émissions supplémentaires annuelles de l'aviation internationale française en 2030 par rapport à 2020.**

À l'horizon 2050, il s'agirait de disposer de 6,5 millions d'hectares de nouvelles forêts pour compenser les émissions de CO₂ de l'aviation civile internationale française. Sur le territoire français métropolitain de 55 millions d'hectares, on compte déjà 45 millions d'hectares utilisés par les forêts ou l'agriculture, le reste étant constitué de surfaces urbanisées en expansion.

La compensation carbone, si elle était faite sur le territoire national, poserait indéniablement des conflits d'usage des sols. La nécessité de nourrir de plus en plus de monde impose d'étendre les surfaces cultivées, l'étalement urbain réduit de plus en plus les surfaces agricoles qui sont passées de 34 à 29 millions d'hectares de 1960 à 2009 avec un rythme d'artificialisation des sols qui a atteint 56 000 hectares par an entre 2000 et 2004, correspondant à la surface d'un département artificialisé tous les 7 ans.⁵² Bien que ce rythme ralentisse ces dernières années, l'étalement urbain est encore une réalité.

Si la France devait compenser ses émissions liées à l'aviation internationale sur son propre territoire, ce serait donc tout simplement impossible en gardant un tel niveau de surfaces agricoles pour nourrir la population et un taux similaire d'artificialisation des sols.

À titre comparatif, il faudrait remplacer la moitié des surfaces aujourd'hui dédiées aux infrastructures, aux villes et aux routes pour planter des forêts afin de parvenir à une croissance neutre des émissions du transport aérien à l'horizon 2045.

Enfin, le stockage du CO₂ dans des projets forestiers n'est pas éternel. Lorsqu'une forêt arrive à maturité, elle cesse de capter du carbone à l'instar de la forêt Guyanaise. On estime que pour les forêts métropolitaines, le puits de carbone annuel est de 87 Mt CO₂e pour un puit espéré à long terme de 3343 Mt CO₂e (c'est à dire que la capacité totale de stockage de CO₂ des forêts métropolitaines est de 3343 Mt, donc à un rythme de 87 Mt/an, nous disposons de 38 années de stockage).⁵³ Outre le travail de reboisement massif du territoire au détriment d'usages concurrents des sols, il s'agira également d'instaurer une gestion efficace des forêts afin que le puit de carbone ne diminue pas. Les incendies, les

⁴⁹ A noter que l'année de référence initiale (2020) ayant vu le trafic international anormalement perturbé par la crise du COVID-19, portera finalement sur les émissions de 2019

⁵⁰ Évaluation Française des Ecosystèmes et Services Écosystémiques (EFESE), La séquestration de carbone par les écosystèmes en France, mars 2019, page 27

⁵¹ L'ADEME estime la séquestration carbone nette d'un hectare de forêt à -4,8 tCO₂e/ha/an.

⁵² Centre de Ressources Documentaires sur l'Aménagement, le Logement et la Nature (CRDALN), L'étalement urbain en France, synthèse documentaire, février 2012, page 9

⁵³ Évaluation Française des Ecosystèmes et Services Écosystémiques (EFESE), Loc cit.

sécheresses, les ravageurs et les maladies dont l'occurrence seront indéniablement augmentées par le réchauffement climatique viendront annihiler une partie de la compensation que nous pouvons attendre⁵⁴.

Le dispositif de compensation CORSIA ne prévoit cependant pas que la compensation des émissions imputables à un territoire ait lieu sur celui-ci. Ce sont les compagnies aériennes qui sont chargées de compenser ces émissions en achetant des crédits carbone pouvant se situer à n'importe quel endroit du globe à partir du moment où il a été identifié par une autorité compétente comme compatible avec les conditions posées par le dispositif. Cela posera des problèmes au niveau de la répartition des projets de captation de CO₂ qui iront en priorité là où la tonne de CO₂ est la moins chère créant dans ces pays d'importantes surfaces de forêt dont les arbres seront choisis en fonction de leur productivité en termes de stockage, faisant fi de l'équilibre de l'écosystème local. Ces pays risquent de se retrouver avec des espaces de forêts sanctuarisés sur des millions d'hectares privant les habitants d'espaces pour l'agriculture ou leur développement afin que le trafic aérien international puisse prospérer.

De plus, les compagnies aériennes pourront réduire leur obligation de compensation si elles utilisent des biocarburants dont la réduction d'émissions de CO₂ par rapport au kérosène n'est que de 10%. Enfin, le système CORSIA ne concerne que les émissions liées à la combustion du kérosène qui représentent, comme on l'a vu précédemment, environ la moitié de l'impact climatique global du secteur aérien.

Ce système de compensation (CORSIA) pose donc un problème en termes de solidarité internationale en plus de manquer de fiabilité sur le plan environnemental.

Pour résumer :

Le système de compensation ne prend en compte que le surplus annuel d'émission par rapport à la valeur de 2019 et n'intègre pas la part du « hors CO₂ » liée à la nébulosité induite par les avions et responsable de 50% de l'impact de l'aviation sur le climat. Les aléas météorologiques et catastrophes naturelles mettent à mal une projection durable de cette forme de stockage du CO₂ (sécheresse, incendies, etc) et l'allocation des crédits allant au plus rentable pour les compagnies risque de mener à la création de forêts artificielles dédiées au stockage du carbone et niant les particularités des modes de vie et écosystèmes locaux. La création de ces forêts autant que les autres programmes de réduction ou compensation des émissions peuvent entrer en conflit avec les besoins de développement des habitants pour permettre à l'aviation civile internationale de perdurer tout en véhiculant l'image d'un secteur « écologique ».

IV.8. Innovations de rupture

Différentes idées font leur chemin pour révolutionner le monde de l'aviation. Celles-ci présentent des innovations majeures mais semblent plus orientées vers l'amélioration du confort ou la réduction des distances que vers une aviation zéro carbone. En voici trois différentes :

Vols orbitaux

Pour les vols de très longue distance, il serait possible de développer un moyen de transport orbital hybride entre les avions et les navettes spatiales. En effet, une propulsion à hydrogène permettrait d'atteindre une altitude suffisante pour laisser ensuite l'aéronef en orbite autour de la Terre. Il s'agirait ensuite simplement de le faire redescendre une fois la destination survolée.

Cette technologie ne sera pas une réalité à court terme et restera peut-être de l'ordre du fantasme. Il n'existe pas à notre connaissance de programme de recherche opérationnel dirigé vers ce type d'aviation, ni d'évaluation permettant de connaître le coût énergétique d'une telle opération. Quoi qu'il en soit, cela ne correspondrait qu'à un développement de niche, puisque l'intérêt de ces vols est essentiellement d'aller plus vite, plus loin.

⁵⁴ Dans le même sens, le plan de reforestation massif opéré en Turquie qui consistait à planter 11 millions d'arbres le 11/11/2011 a été anéanti par un épisode de sécheresse qui a décimé 90% des arbres moins de 3 mois après leur plantation.

Avions supersoniques

Une autre forme de rupture en matière de déplacements de longue distance serait l'avion supersonique. Il s'agit d'un avion dont la vitesse dépasserait celle du son, contrairement à l'avion que nous connaissons : la vitesse de l'avion subsonique est en moyenne proche des 900 km/h. Depuis l'arrêt du Concorde, il n'existe plus d'avions supersonique mais différents projets sont en cours de développement ([Nasa](#), [Boom supersonique](#)).

Ainsi, il serait bien plus rapide de parcourir ces distances mais au prix d'une consommation de carburant beaucoup plus importante. Sur des trajets similaires, des études ont estimé que ces avions supersoniques pourraient consommer 5 à 7 fois plus par passager qu'un avion traditionnel⁵⁵.

Là encore, il s'agit d'une innovation qui va à l'encontre d'une réduction des émissions de GES.

« L'avion connecté et autonome »

Parmi les autres programmes de recherche, on trouve l'avion connecté et autonome. Cet avion inclurait des nouveaux modes d'opérations, avec une prise en compte toute particulière des cyber-menaces. La question écologique est complètement évincée des projets de recherche et il semble impossible d'avancer sur cette technologie sans entraîner une consommation de carburant considérable.

Le Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire, dans son rapport sur les perspectives du secteur aérien dans les prochaines années, veut ainsi notamment agir sur « *les nouvelles méthodes de développement et de production* », en adaptant à l'aéronautique les technologies **d'intelligence artificielle, de big-data**, en travaillant sur de nouveaux processus de production et en développant le recours aux simulations numériques, notamment pour la certification.⁵⁶ La réduction des émissions du secteur est donc quasi absente.

Aujourd'hui, il semblerait donc que les innovations technologiques s'orientent préférentiellement vers une amélioration des performances des aéronefs plutôt que vers une diminution de leurs impacts... à moins que le retour en force du dirigeable ne change la donne ?

IV.9. Les dirigeables, comme transport aérien d'avenir

Aujourd'hui, le dirigeable est ce qui s'apparente le plus à une solution d'avenir pour le transport aérien en proposant une alternative intéressante sur le plan économique, capacitaire et environnemental. Il semble cependant difficile de l'assimiler à l'aviation telle que nous la connaissons, du fait d'une vitesse limitée qui rend le dirigeable moins intéressant qu'un voyage en train mais tout de même plus rapide qu'un voyage en bateau.

⁵⁵ International Concil on Clean Transportation (ICCT), Anastasia Kharina, Tim MacDonald, Dan Rutherford, Environmental performance of emerging supersonic transport aircraft, 2018

⁵⁶ Stratégie Nationale Du Transport Aérien 2025, Ministère de la transition écologique, 2020, page 43

V. Scénarios d'évolution envisagés à horizon 2030 et 2050

Point méthodologique

Afin de comprendre comment pourraient évoluer les émissions de GES du secteur aérien, nous avons bâti un modèle d'évolution des émissions de GES.

Celui-ci s'appuie sur les critères suivants :

- Le nombre de passagers annuel et son évolution
- L'emport moyen par avion et son évolution
- Le nombre total de mouvements aériens
- La distance moyenne par vol et son évolution
- Les gains en efficacité énergétique apportés par la technique
- La consommation moyenne par mouvement aérien
- L'intensité carbone des carburants utilisés
- Les émissions liées à la fabrication des carburants
- Les émissions considérées pour les traînées de condensation et leur évolution
- Le nombre de tonnes de CO2 compensées via le mécanisme CORSIA

En jouant sur ces différents paramètres, on peut identifier les émissions de GES induites par l'aviation dans les prochaines décennies.

Le périmètre retenu est l'ensemble des avions décollant ou atterrissant dans un aéroport français.

Pour initier le modèle, nous prenons donc les données suivantes pour l'année 2018

Paramètres initiaux		
Année de référence		2018
Nombre de passagers	en millions	172,40
Emport moyen		109,50
Distance moyenne par vol	en km	1 600,00
Conso moyenne par mvt	en L	10 180,00
Facteur émission kérosène	en kg CO2e/L	2,52
Coût carbone fabrication carburant	en kg CO2e/L	0,55
Facteur émission des traînées de condensation	en kg CO2e/L	2,52

Variables utilisées

Pour chaque variable, nous définissons une borne supérieure et une borne inférieure ainsi qu'une valeur de poursuite des tendances observées. Ces paramètres permettent de simuler les évolutions sans ruptures comportementales ou technologiques.

Dans le tableau suivant, le chiffre en rouge caractérise celui avec l'effet climat le plus important. Le chiffre sur fond vert correspond à l'effet climat le plus faible.

Variable	Min.	Tendance	Max.	Explications
Evolution annuelle du nombre de passagers	1,2%	2,7%	5,5%	<p>Compte tenu des contraintes d'infrastructures, d'évolution du marché, etc. il semble difficile d'imaginer une croissance plus soutenue que 5,5% par an.</p> <p>La France n'ayant pas atteint le nombre de vols par habitant des pays Nord Européen, nous excluons des scénarios de diminution du nombre de passagers sans incitation forte que nous étudierons dans les scénarios de rupture.</p>
Evolution annuelle de l'emport moyen	0%	1,4%	3,7%	<p>L'emport moyen a nettement augmenté ces dernières années. Les avions étaient encore faiblement remplis il y a 20 ans (le taux d'occupation est passé de 64% à 84%). Les marges de manœuvres se restreignent donc et augmenter l'emport moyen revient de plus en plus à changer la flotte pour des avions plus gros.</p> <p>Une diminution de l'emport moyen, si elle est possible, réduirait à néant les efforts menés pour limiter la croissance des émissions du secteur aérien, nous prenons donc comme cas le plus défavorable une stagnation.</p> <p>Compte-tenu des capacités des avions, nous fixons une limite maximum d'emport moyen à 249.</p>
Evolution annuelle de la distance moyenne par vol	0%	1,7%	3,5%	<p>La tendance est à la diminution des vols intérieurs ou de courte distance, notamment du fait d'une concurrence du rail. Il est donc peu probable de voir la distance moyenne diminuer.</p> <p>Le développement de l'aviation aux 4 coins du globe entraîne de plus en plus de vols long-courriers.</p> <p>L'évolution maximale constatée sur les 5 dernières années est de 3,5% par an (Orly, Beauvais, Lyon).</p> <p>Nous fixons une limite maximum de distance moyenne à 4 000 km, ce qui correspond à la valeur moyenne actuelle de distance par passager au départ de Roissy CDG.</p>
Evolution tendancielle de l'efficacité énergétique	0,1%	0,1%	0,1%	<p>L'évolution tendancielle observée est de 0,1%, cela inclut les gains en efficacité liés à l'amélioration technique actuelle ou à l'optimisation du remplissage ainsi que les pertes liées à un changement de flotte pour une flotte plus imposante, l'optimisation ou non des trajets etc... Par défaut, nous considérons ce paramètre stable pour les prochaines décennies. Les gains techniques sont proposés dans les paramètres suivants.</p> <p>A noter que ce paramètre pourrait tout de même s'inverser si nous atteignons une asymptote dans les progrès techniques mais</p>

				que l'emport moyen et le changement de flotte induit continue de progresser. Nous n'avons pas trouvé de valeur limite mais une approximation d'un tiers de la valeur de l'emport moyen semble un bon ordre de grandeur. Exemple : s'il n'y a pas de prolongation tendancielle des progrès techniques et emport moyen de +3%, on peut tabler sur une perte d'efficacité de -1%
Gain supplémentaire technique	0% Pas d'optimisation supérieure au tendanciel technique	0,6% Mise en place des opérations d'efficacité imaginées sur 10 ans	1,2% Mise en place accélérée des opérations d'efficacité imaginées	<p>Les gains supplémentaires les plus évidents sont liés à l'optimisation des opérations de roulage. Le gain potentiel est de 3% à répartir au mieux sur 5 ans (scénario max, soit 0,6% par an), en moyenne sur 10 ans (tendanciel soit 0,3% par an).</p> <p>Les autres gains techniques listés par l'étude du think tank The Shift Project sont : le remplacement de certains vols par des appareils à hélice, la limitation du fuel tankering et l'optimisation des trajectoires. Le gain possible tout cumulé est du même ordre de grandeur que le gain lié aux opérations au sol.</p> <p>Compte tenu des connaissances actuelles, nous fixons une limite maximum à un gain total de 6% d'efficacité énergétique d'ici 2030 et 10% d'ici 2050</p>
Utilisation d'agro carburants	0% Utilisation marginale des agrocarburants	0,2% Utilisation du potentiel maximum français pour le transport sans concurrence avec d'autres usages	0,4% Potentiel maximum incluant de nouveaux développements et/ou une concurrence avec d'autres usages	En utilisant l'ensemble des biocarburants qui pourraient être destinés au transport en 2050, cela représente 6,8 Mtep à l'échelle européenne, soit 1,2 Mtep en France, cela donne une croissance de 40 Ktep / an max, soit 0,2% de la consommation actuelle. C'est la valeur que nous utilisons en tendanciel. La valeur max. suppose le développement de nouvelles technologies de biocarburant ou l'utilisation de matières directement en concurrence avec l'alimentation
Changement de carburant	0% Pas d'utilisation de carburants de synthèse	0,1% Potentiel considéré à 50% de celui des agrocarburants	0,2% Potentiel considéré à 50% de celui des agrocarburants	<p>Il n'existe pas aujourd'hui de technologies matures adaptées au secteur aérien. Nous incluons cela dans un volet « aviation de rupture ».</p> <p>L'utilisation de carburants de synthèse en utilisant du CO2 capturé dans l'air nécessite pour être compétitif un coût de la tonne de CO2 de 2 000 à 5 000 € (transport et environnement) ce qui rend son développement très incertain.</p> <p>Un scénario optimiste consiste à projeter un gain moitié moins élevé que celui des agrocarburants dont la technologie est plus mature</p>
Optimisation de la production	-0,3% Pas d'optimisation supérieure au tendanciel technique	0% Mise en place des opérations d'efficacité imaginées sur 10 ans	0,6% Mise en place accélérée des opérations d'efficacité imaginées	La production du kérosène est soumise à de fortes contraintes inhérentes à l'industrie pétrolière. Les pétroles extraits sont de moins bonne qualité et ont un rendement énergétique décroissant tandis que la

amont de kérosène	Perte d'efficacité énergétique des procédés d'extraction		Gain lié à la captation de CO2 en sortie de raffinerie à partir de 2030	<p>demande se focalise sur des pétroles de meilleure qualité nécessitant plus d'énergie dans le raffinage. Ainsi, la production amont de kérosène devrait plutôt avoir tendance à augmenter (0,3% par an, scénario minimal) ou à stagner (scénario tendanciel).</p> <p>Il existe néanmoins une possibilité, à partir de 2030, d'avoir recours aux technologies de captage du CO2 en sortie de raffinerie. En imputant à la production de kérosène 50% de ce gain, en considérant l'équipement progressif de 100% des raffineries entre 2030 et 2050 et un gain CO2 sur le procédé de raffinage de 50%, cela donne un scénario max. de 0,6% par an à partir de 2030</p>
Diminution de l'impact des traînées de condensation	0% Aucune mesure sur les traînées de condensation	-5% Limitation progressive à partir de 2030	-10% Limitation progressive à partir de 2025	Il est possible de réduire jusqu'à 55% l'impact des traînées de condensation en optimisant les vols les plus responsables. En supposant les défis de sécurité et technologiques levés, nous pouvons imaginer un gain allant jusqu'à 10% par an à partir de 2025 et plafonné à 55% (scénario max.).
Prorata du vol pris en compte dans les calculs	53% Part minimum si les vols intérieurs hors outre-mer tombent à 0%	56,2% Affectation actuelle	64% Part des Français dans les avions	<p>Si les vols intérieurs sont à 100% imputés aux émissions françaises, seul 50% des vols internationaux le sont. De ce fait, les normes de comptabilité actuelles font que 56,2% de l'ensemble des émissions des vols au départ ou à destination de la France sont prises en compte. (scénario tendanciel)</p> <p>En utilisant une autre répartition et en considérant les vols des Français dans leur intégralité, nous avons uniquement pu obtenir la répartition suivante : 60% des passagers internationaux sont français (direction générale de l'économie). En supposant que la part des vols intérieurs fait par des étrangers compense la part des vols intérieurs dans d'autres pays fait par des Français (ce qui sous-estime certainement ce nombre), on pourrait prendre en considération 64% des émissions totales (scénario max)</p>
Utilisation du système de compensation des émissions	0 Pas de système de compensation des émissions	15 000 ha De surfaces transformées en forêts supplémentaires	80 000 ha Soit l'équivalent de l'ensemble des terres artificialisées chaque année	<p>Il est aujourd'hui très difficile d'estimer ce que peut apporter le système CORSIA en termes de compensation tant les impacts sont difficiles à déterminer. Par conséquent, nous avons supposé les impacts d'une compensation directe et sur le territoire français liée au stockage naturel du carbone et exprimée en équivalent hectare de forêt.</p> <p>Nous retenons le potentiel de séquestration nette d'un hectare de forêt de l'ADEME : -4,8 tCO2/ha/an. C'est-à-dire qu'un ha de forêt planté l'année N permet de stocker 4,8 tCO2e, 4,8 autre l'année N+1 etc... L'impact augmente donc à mesure que l'on augmente la surface consacrée au stockage lié à l'aviation.</p> <p>En valeur max. nous prenons l'équivalent des terres artificialisées chaque année, soit environ 80 000 ha. En valeur intermédiaire, 15 000 ha,</p>

				soit l'équivalent de 10 ha par intercommunalité par an
Aviation de rupture	0%	0,25%	0,9%	<p>En imposant un cahier des charges strict au secteur aérien, une réglementation et des moyens financiers adéquats, nous imaginons ici l'avion du futur.</p> <p>Transport et environnement affiche un objectif de 30% en 2040, The Shift Project de 25% en 2030.</p> <p>Les temps de développement, puis d'industrialisation, de tests, de commandes et de renouvellement des avions existants rendent difficile d'imaginer un changement de plus de 3% de la flotte à partir de 2040 (scénario max). Transport et environnement compte sur 1% (scénario tendanciel)</p>
	Les moyens ne sont pas mis pour inventer l'aviation du futur	1% de renouvellement de la flotte pour un avion consommant 25% de moins dès 2035.	3% de renouvellement de la flotte pour un avion consommant 30% de moins dès 2040. 1% de renouvellement de la flotte dès 2030 (0,3%)	

Afin d'identifier des scénarios alternatifs et de prendre en compte différentes pistes de réflexion sur l'aviation du futur, voici deux alternatives possibles aux variables d'évolution du nombre de voyageurs et d'évolution des aéronefs :

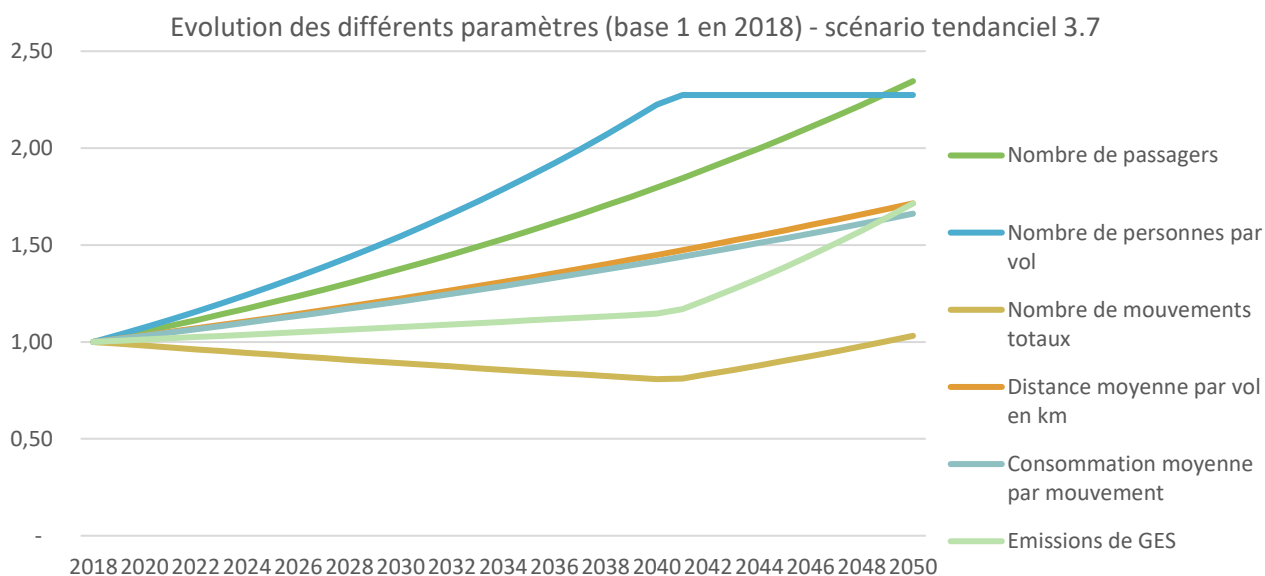
Diminution du nombre de voyageurs aériens	- 1,1%	- 2,5%	- 5,5%	<p>Diminuer le nombre de voyageurs dans un scénario de sobriété n'a pas de limite puisqu'il « suffit » d'interdire les vols aériens. La valeur max. proposée ici consiste à prendre en compte la durée de vie moyenne des avions et à ne pas les remplacer lorsqu'ils arrivent en fin de vie.</p> <p>La valeur intermédiaire consiste à appliquer les mesures de sobriété inscrites dans le rapport du Shift Project.</p> <p>La valeur minimale consiste à la mise en place d'une taxation carbone passant par une valeur de 150€ par tonne en 2030.</p>
	Taxation carbone	Paquet de mesures de sobriété	Non renouvellement de la flotte d'avions	
Aviation du futur	0%	-0,25%	-0,5%	<p>Ce paramètre est à cumuler avec le paramètre aviation de rupture.</p> <p>L'aviation du futur ne sera pas nécessairement plus verte. Différents projets ont pour ligne de mire avant tout l'amélioration du service, au détriment parfois des consommations.</p> <p>De la même manière qu'il est possible d'imaginer la généralisation d'avions à faible émission, nous pouvons imaginer l'arrivée sur le marché d'avions à plus forte émission. L'exemple des SUV au niveau automobile démontre ; s'il le fallait, que cette hypothèse n'est pas farfelue.</p>
	Un moratoire empêche le développement d'une aviation plus émettrice	1% de renouvellement de la flotte pour un avion consommant 25% de plus dès 2030.	2% de renouvellement de la flotte pour un avion consommant 25% de plus dès 2030	

Scénario 1A : Scénario tendanciel 3.7

Paramètres utilisés :

- Taux d'évolution du nombre de passagers annuels : 2,7%
- Taux d'évolution de l'emport moyen : 3,7%
- Taux d'augmentation de la distance moyenne : 1,7%
- Evolution du gain supplémentaire technique : 0,0%
- Evolution de la part des agrocarburants : 0,0%
- Evolution de la part des carburants de synthèse : 0,0%
- Optimisation de la production amont du carburant : 0,0%
- Diminution de l'effet des traînées de condensation : 0,0% (plafonné à 55%)
- Nombre d'ha de forêt annuels pour compensation : 0
- Projet aviation du futur : -
- Prorata du total des vols pris en compte dans le périmètre : 56,2%

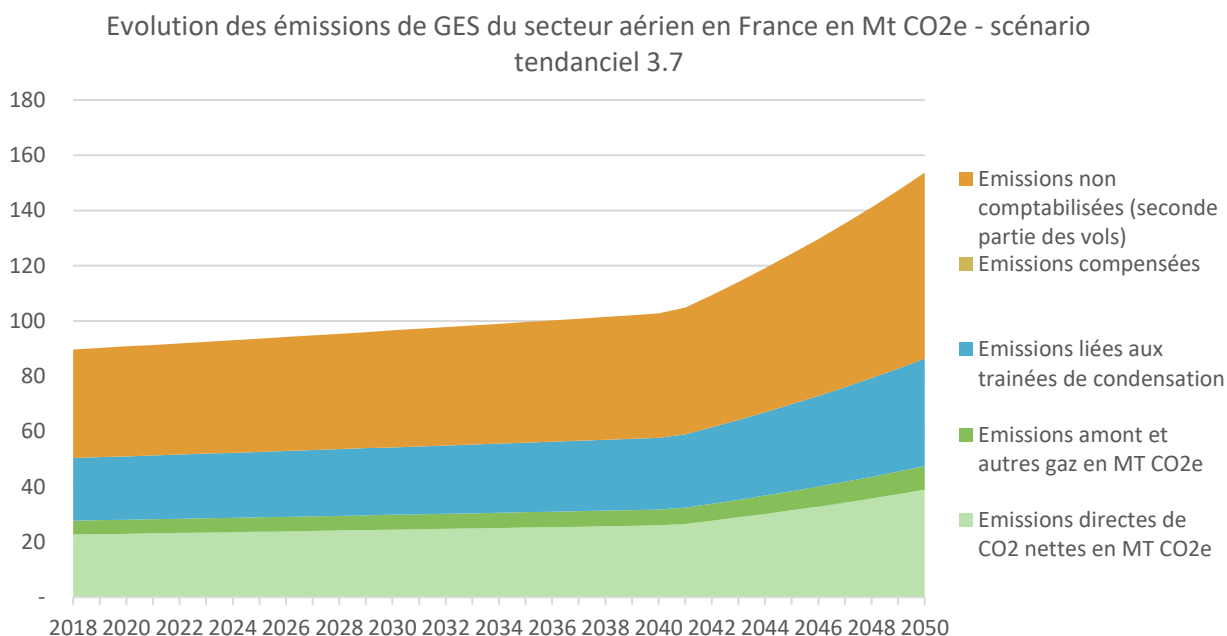
Résultats :



Dans ce scénario, l'augmentation de l'emport moyen évolue en poursuite des tendances des dernières années et atteint un plafond de 249 passagers en 2041. D'ici à 2041, son évolution est supérieure au nombre de passagers ce qui a pour conséquence de diminuer le nombre de mouvements aériens. Ceux-ci repartent à la hausse une fois le plafond de l'emport moyen atteint.

Evolution des principaux paramètres				
Année de référence		2018	2050	évolution
Nombre de passagers	<i>en millions</i>	172,40	404,38	135%
Emport moyen		109,50	249,00	127%
Nombre de mouvements	<i>en milliers</i>	1 574,43	1 624,02	3%
Distance moyenne par vol	<i>en km</i>	1 600,00	2 744,04	72%
Conso moyenne par mvt	<i>en L</i>	10 178,89	16 916,05	66%
Facteur émission kérosène	<i>en kg CO2e/L</i>	2,52	2,52	0%
Coût carbone fabrication carburant	<i>en kg CO2e/L</i>	0,55	0,55	0%
Facteur émission traînées de condensation	<i>en kg CO2e/L</i>	2,52	2,52	0%

La forte évolution de l'emport moyen permet de stabiliser les émissions de GES jusqu'en 2041, celles-ci augmentent de manière importante ensuite pour atteindre 86 Mt CO2e en 2050, dont 38,9 Mt CO2e d'émissions directes.



Du fait de l'évolution du nombre de passagers, les émissions par passager-kilomètre diminuent de 54% à 53gCO2e par passager.km en 2050.

Dans ce scénario, il n'est pas fait appel à un procédé de compensation des émissions de GES.

En cumulé, le secteur aérien émet 1 772 Mt CO2e sur la période 2020 – 2050, dont 798 Mt CO2e directes.

Uniquement sur la partie émissions directes, cela correspond à 34% de l'ensemble du budget carbone des transports tel que défini dans la SNBC et à 10% de l'ensemble du budget carbone, tous secteurs confondus.

En 2050, les émissions directes associées à l'aviation représenteraient 47% des émissions totales françaises.

SITUATION 2050

Objectif émissions France en 2050 en MT CO2e	80,00
Objectif émissions transport France en 2050 en MT CO2e	7,00
Emissions directes associées à l'aviation en MT CO2e	38,90
Emissions totales associées à l'aviation en MT CO2e	86,36

Budget Carbone France 2020-2050 en MT CO2e	7 950,00
Budget carbone transport France 2020-2050 en MT CO2e	2 385,00
cumul des émissions directes de l'aviation en MT CO2e	798,35
Cumul des émissions totales de l'aviation en MT CO2e	1 772,33

Objectifs 2030

Objectif UE aviation 2030 par rapport à 2017	-36%
Objectif selon trajectoire SNBC 2030	-32%
Objectif scénario 1,5°C compatible en 2030	-72%
Evolution des émissions de l'aviation en 2030	8%

Le point d'étape à 2030 n'est guère satisfaisant non plus, puisque les émissions de l'aviation augmenteraient de 8% alors que les différents scénarios français et européens tablent sur une baisse, respectivement de 32% et 36%. Ce scénario n'est évidemment pas compatible avec une trajectoire 1,5°C, ni même 2°C.

Conclusion :

Le scénario tendanciel 3.7 est un scénario qui prolonge les tendances actuelles, tant en termes de demandes (augmentation du nombre de passagers, de la distance...) que des progrès techniques. Ce scénario démontre, s'il en était besoin, que les tendances actuelles du secteur aérien ne sont pas compatibles avec les objectifs climatiques, notamment de l'Accord de Paris.

A noter que l'augmentation de l'emport de 3,7% par an, bien qu'elle soit cohérente avec la tendance connue ces dernières années, amènerait à doubler l'emport moyen en 20 ans, c'est-à-dire remplacer la flotte des aéroports par des avions deux fois plus grands en termes de capacité. Ce scénario prolonge donc la tendance d'évolution de l'emport mais est volontairement surestimé.

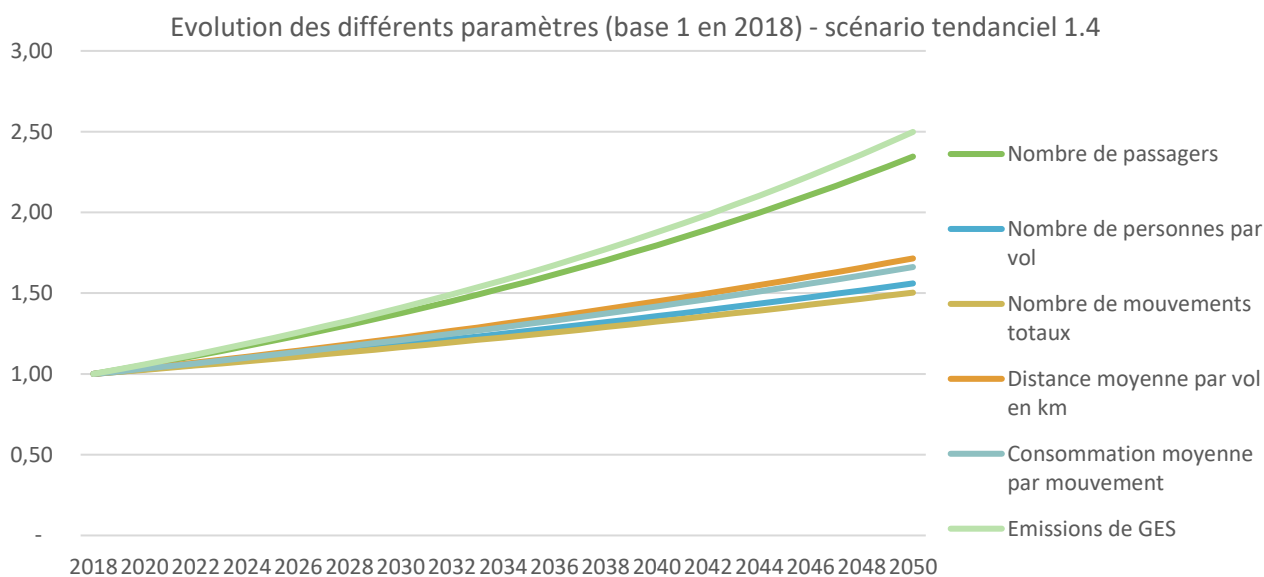
Scénario 1B : Scénario tendancier 1.4

Nous avons donc décidé de faire une nouvelle simulation en prenant cette fois-ci une augmentation de l'emport plus faible, permettant vraisemblablement d'être plus fidèle à la réalité. En effet, **au regard des projections du groupe Aéroport de Paris, l'emport devrait augmenter de 1,4% par an**⁵⁷. Nous avons décidé d'appliquer cette augmentation à l'ensemble des vols, sans plafonnement.

Paramètres utilisés :

- Taux d'évolution du nombre de passagers annuels : 2,7%
- Taux d'évolution de l'emport moyen : 1,4%
- Taux d'augmentation de la distance moyenne : 1,7%
- Evolution du gain supplémentaire technique : 0,0%
- Evolution de la part des agrocarburants : 0,0%
- Evolution de la part des carburants de synthèse : 0,0%
- Optimisation de la production amont du carburant : 0,0%
- Diminution de l'effet des traînées de condensation : 0,0% (plafonné à 55%)
- Nombre d'ha de forêt annuels pour compensation : 0
- Projet aviation du futur : -
- Prorata du total des vols pris en compte dans le périmètre : 56,2%

Résultats :

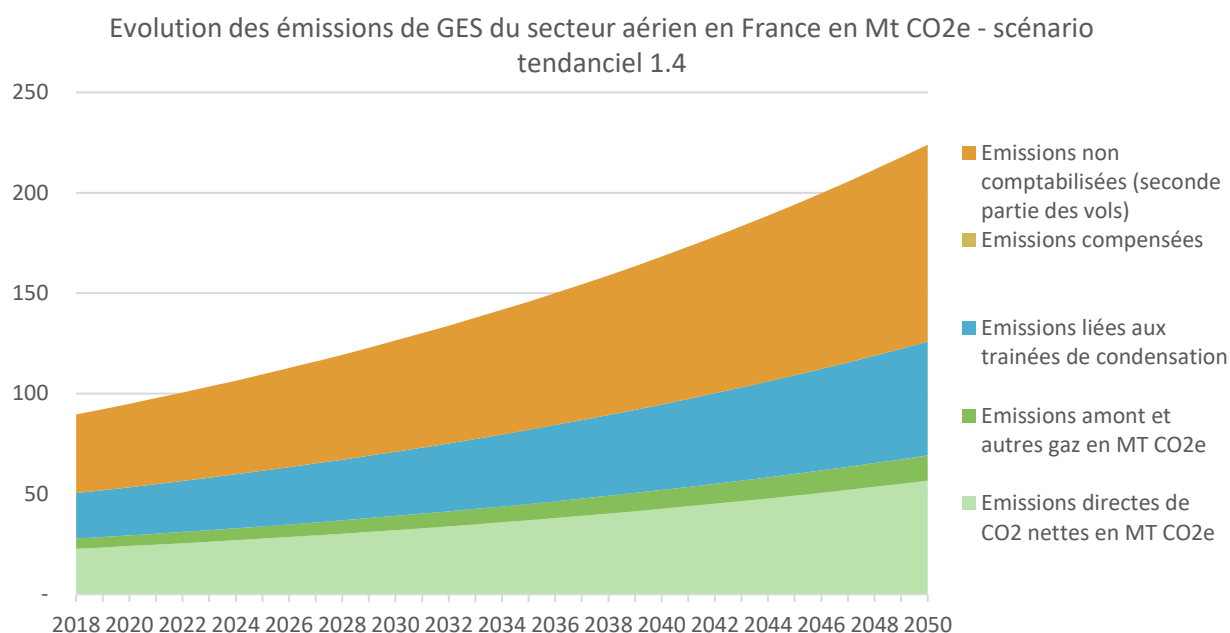


L'augmentation des émissions de GES augmente cette fois-ci de manière relativement similaire à l'évolution du nombre de passagers. L'ensemble des paramètres croient de manière soutenue.

⁵⁷ Conclusions de la CNDP sur la concertation Terminal 4 Contribution de la DGAC pour la réponse des pouvoirs publics à la demande de précision n°5

Evolution des principaux paramètres				
Année de référence		2018	2050	évolution
Nombre de passagers	<i>en millions</i>	172,40	404,38	135%
Emport moyen		109,50	170,86	56%
Nombre de mouvements	<i>en milliers</i>	1 574,43	2 366,81	50%
Distance moyenne par vol	<i>en km</i>	1 600,00	2 744,04	72%
Conso moyenne par mvt	<i>en L</i>	10 178,89	16 916,05	66%
Facteur émission kérosène	<i>en kg CO2e/L</i>	2,52	2,52	0%
Coût carbone fabrication carburant	<i>en kg CO2e/L</i>	0,55	0,55	0%
Facteur émission traînées de condensation	<i>en kg CO2e/L</i>	2,52	2,52	0%

Selon ce scénario reprenant les mêmes paramètres que le précédent avec toutefois une variation de l'emport moyen de +1,4%/an au lieu de +3,7%, nous obtenons donc un scénario au nombre de mouvements plus important, ce qui se ressent sur les émissions de GES.



Du fait d'une plus faible évolution du nombre de passagers par vol, les émissions par passager-kilomètre diminuent de 36% pour atteindre 77gCO2e par passager km en 2050.

Dans ce scénario, il n'est pas fait appel à un procédé de compensation des émissions de GES.

En cumulé, le secteur aérien émet 2 498 Mt CO2e sur la période 2020 – 2050, dont 1 125 Mt CO2e directes.

Uniquement sur la partie émissions directes, cela correspond à 47% de l'ensemble du budget carbone des transports tel que défini dans la SNBC et à 14% de l'ensemble du budget carbone, tous secteurs confondus.

En 2050, les émissions directes associées à l'aviation représenteraient 71% des émissions totales françaises.

SITUATION 2050

Objectif émissions France en 2050 en MT CO2e	80,00
Objectif émissions transport France en 2050 en MT CO2e	7,00
Emissions directes associées à l'aviation en MT CO2e	56,69
Emissions totales associées à l'aviation en MT CO2e	125,85

Budget Carbone France 2020-2050 en MT CO2e	7 950,00
Budget carbone transport France 2020-2050 en MT	2 385,00
cumul des émissions directes de l'aviation en MT CO2e	1 125,28
Cumul des émissions totales de l'aviation en MT CO2e	2 498,11

Objectifs 2030

Objectif UE aviation 2030 par rapport à 2017	-36%
Objectif selon trajectoire SNBC 2030	-32%
Objectif scénario 1,5°C compatible en 2030	-72%
Evolution des émissions de l'aviation en 2030	41%

Le point d'étape à 2030 est également catastrophique, puisque les émissions de l'aviation augmenteraient de 41% alors que les différents scénarios français et européens tablent sur une baisse, respectivement de 32% et 36%. Ce scénario n'est évidemment pas compatible avec une trajectoire 1,5°C, ni même 2°C.

Conclusion :

Le scénario tendanciel 1.4 montre l'importance de conserver un fort taux d'augmentation de l'emport moyen. Ce paramètre unique ajoute 726 Mt CO2e au bilan cumulé de l'aviation d'ici à 2050.

Or, maintenir une forte évolution de l'emport moyen ne peut plus se faire en remplissant au maximum les avions tels qu'ils sont aujourd'hui. Pour ne pas avoir un effet rebond lié à un changement d'aéronefs, il devient impératif de jouer sur le nombre de sièges par avion, c'est-à-dire de réduire la place consacrée aux classes business et premières.

A noter que ces scénarios excluent toute rupture technologique permettant de décarboner les mouvements aériens. Ces ruptures sont tout à fait imprévisibles et incertaines et dès lors ne peuvent être considérées comme des tendances.

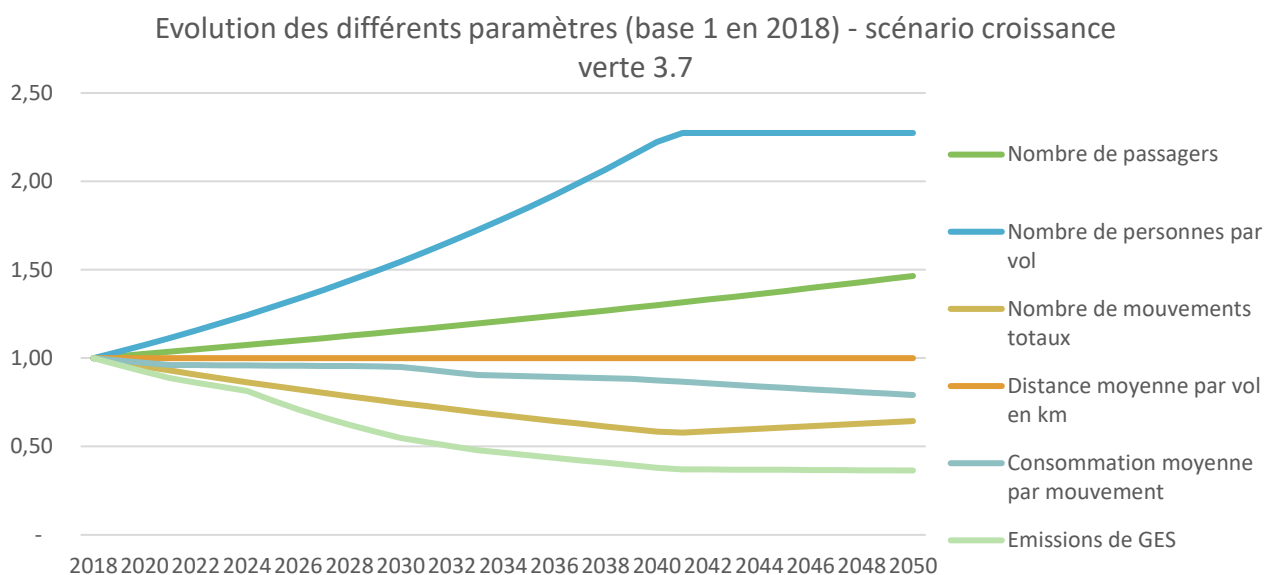
Scénario 2A : Scénario croissance verte 3.7 :

Le scénario « croissance verte » est un scénario très optimiste qui consiste à pousser au maximum tous les curseurs pour réduire autant que possible les émissions de l'aviation.

Paramètres utilisés :

- Taux d'évolution du nombre de passagers annuels : 1,2%
- Taux d'évolution de l'emport moyen : 3,7%
- Taux d'augmentation de la distance moyenne : 0,0%
- Evolution du gain supplémentaire technique : 1,2%
- Evolution de la part des agrocarburants : 0,4%
- Evolution de la part des carburants de synthèse : 0,2%
- Optimisation de la production amont du carburant : 0,6%
- Diminution de l'effet des traînées de condensation : 9 % (plafonné à 55%)
- Nombre d'ha de forêt annuels pour compensation : 80 000
- Projet aviation du futur : 0,9% dès 2030
- Prorata du total des vols pris en compte dans le périmètre : 56,2%

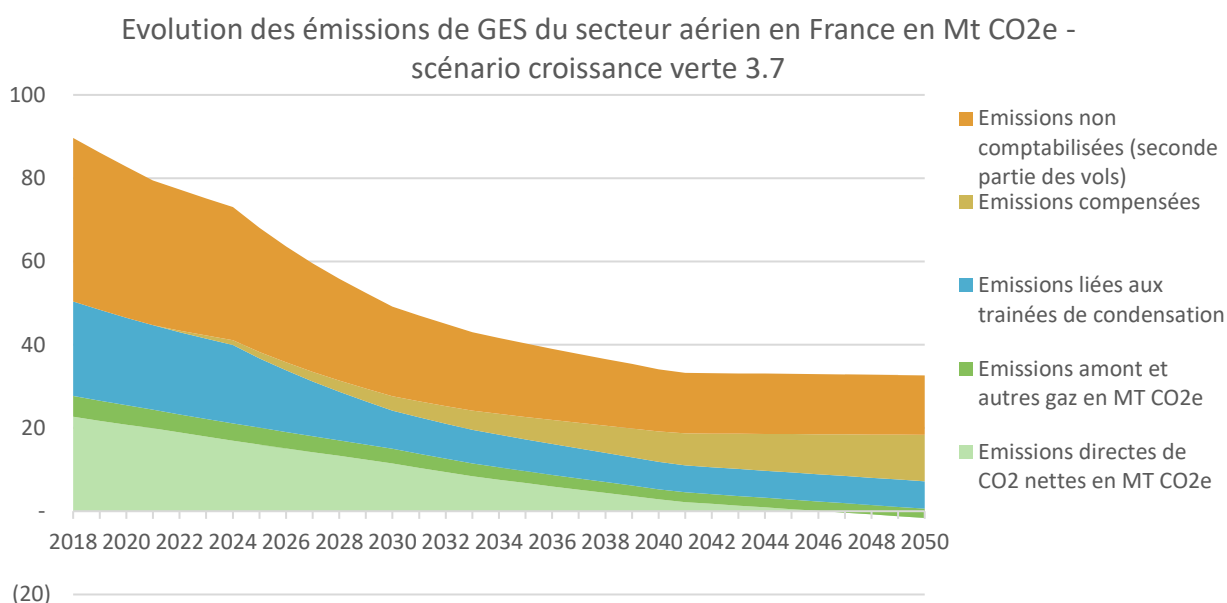
Résultats :



Avec une évolution de l'emport moyen de 3,7% par an, on retrouve une courbe similaire au scénario tendanciel 3.7, avec un plafond atteint en 2041. Le nombre de mouvements quant à lui diminue pour se stabiliser à environ 2/3 de ce qu'il est aujourd'hui. Cette diminution s'explique par une faible évolution du nombre de passagers qui n'augmente « que » de 1,2% par an.

Evolution des principaux paramètres				
Année de référence		2018	2050	évolution
Nombre de passagers	<i>en millions</i>	172,40	252,53	46%
Emport moyen		109,50	249,00	127%
Nombre de mouvements	<i>en milliers</i>	1 574,43	1 014,18	-36%
Distance moyenne par vol	<i>en km</i>	1 600,00	1 600,00	0%
Conso moyenne par mvt	<i>en L</i>	10 178,89	8 053,11	-21%
Facteur émission kérosène	<i>en kg CO2e/L</i>	2,52	2,08	-18%
Coût carbone fabrication carburant	<i>en kg CO2e/L</i>	0,55	0,49	-12%
Facteur émission traînées de condensation	<i>en kg CO2e/L</i>	2,52	1,43	-43%

Cela permet de faire fortement diminuer les émissions de GES en utilisant tous les leviers possibles y compris une compensation très élevée.



Avec tous les curseurs tirés au maximum, les émissions par passager-kilomètre diminuent de 68% pour atteindre 36 gCO2e par passager.km en 2050.

Dans ce scénario, 168 Mt CO2e sont compensées et nécessitent pour cela la plantation de l'équivalent de 2,3 millions d'hectares de forêt, ce qui représente environ 15% de la surface forestière existante en France actuellement ou l'équivalent de 4 départements français.

Au regard de ce scénario, le secteur aérien émet 805 Mt CO2e net sur la période 2020 – 2050, dont 402 Mt CO2e directes.

Uniquement sur la partie émissions directes, cela correspond à 17% de l'ensemble du budget carbone des transports tel que défini dans la SNBC et à 5% de l'ensemble du budget carbone, tous secteurs confondus.

En 2050, les émissions nettes directes associées à l'aviation seraient intégralement compensées. C'est-à-dire que les émissions directes seraient inférieures aux émissions compensées. En revanche, ce calcul ne tient pas compte des émissions indirectes, qui tirent le bilan 2050 à 7,2 Mt CO2e, soit 100% du budget carbone pour le secteur transport en 2050.

SITUATION 2050

Objectif émissions France en 2050 en MT CO2e	80,00
Objectif émissions transport France en 2050 en MT CO2e	7,00
Emissions directes associées à l'aviation en MT CO2e	1,62
Emissions totales associées à l'aviation en MT CO2e	7,19

Budget Carbone France 2020-2050 en MT CO2e	7 950,00
Budget carbone transport France 2020-2050 en MT	2 385,00
cumul des émissions directes de l'aviation en MT CO2e	402,44
Cumul des émissions totales de l'aviation en MT CO2e	805,10

Objectifs 2030

Objectif UE aviation 2030 par rapport à 2017	-36%
Objectif selon trajectoire SNBC 2030	-32%
Objectif scénario 1,5°C compatible en 2030	-72%
Evolution des émissions de l'aviation en 2030	-45%

Le point d'étape à 2030 est satisfaisant au regard des différents scénarios français et européens tablant sur une baisse, respectivement de 32% et 36% puisque les émissions de l'aviation diminueraient de 45%. En revanche, ce scénario n'est toujours pas compatible avec une trajectoire 1,5°C, mais il se rapproche d'une trajectoire 2°C.

Conclusion :

Le scénario croissance verte 3.7 est un scénario volontairement trop optimiste qui permet de comprendre où peut atterrir l'aviation en termes d'émissions de GES si tous les curseurs sont poussés au maximum. Ce scénario considère l'aviation comme une priorité, puisque certains curseurs sont tirés au détriment d'autres choses (utilisation d'agrocultures pouvant se faire au détriment de cultures alimentaires ou d'autres moyens de transport, utilisation de l'hydrogène vert au détriment d'autres moyens de transport, utilisation conséquente de terres pour la compensation...).

Ce scénario table sur l'atteinte rapide de l'ensemble des leviers techniques disponibles et sur l'arrivée de ruptures technologiques qui ne peuvent être portées que par un investissement soutenu et des directives claires. Enfin, la demande joue également un rôle prépondérant avec une stagnation des distances moyennes et une évolution plus restreinte du nombre de passagers.

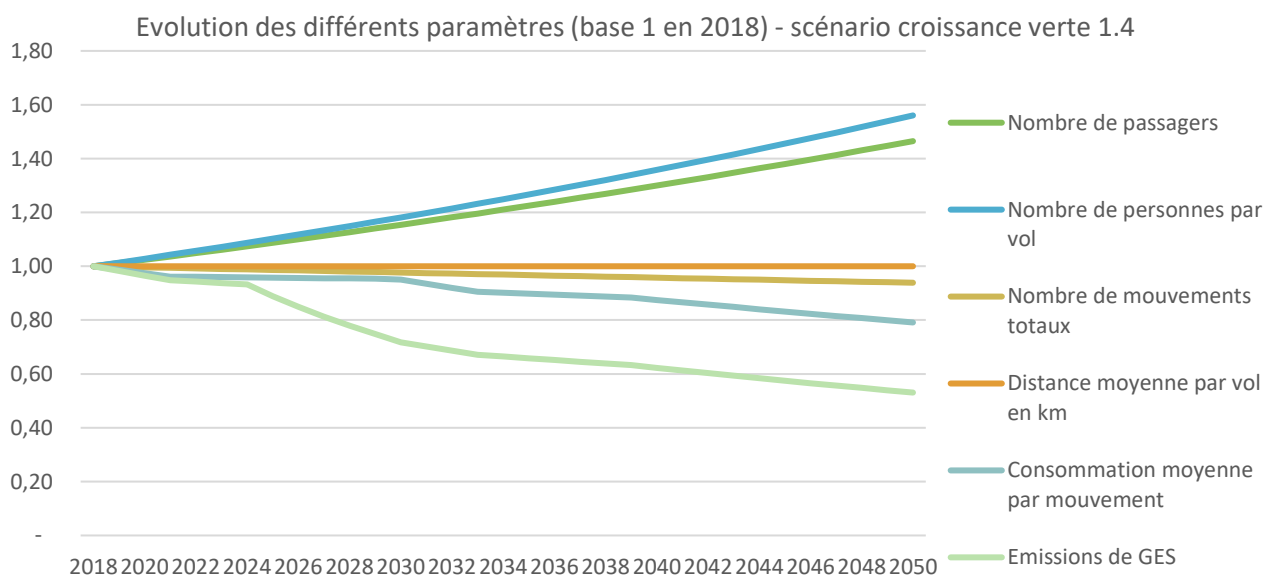
Scénario 2B : Scénario croissance verte 1.4

L'évolution de l'emport moyen de 3,7% par an restant un paramètre difficile à imaginer, nous reprenons ici le scénario précédent en modifiant toutefois l'augmentation de l'emport moyen annuel, le faisant passer à +1,4%/an (projection Aéroport de Paris).

Paramètres utilisés :

- Taux d'évolution du nombre de passagers annuels : 1,2%
- Taux d'évolution de l'emport moyen : 1,4%
- Taux d'augmentation de la distance moyenne : 0,0%
- Evolution du gain supplémentaire technique : 1,2%
- Evolution de la part des agrocarburants : 0,4%
- Evolution de la part des carburants de synthèse : 0,2%
- Optimisation de la production amont du carburant : 0,6%
- Diminution de l'effet des traînées de condensation : 9 % (plafonné à 55%)
- Nombre d'ha de forêt annuels pour compensation : 80 000
- Projet aviation du futur : 0,9% dès 2030
- Prorata du total des vols pris en compte dans le périmètre : 56,2%

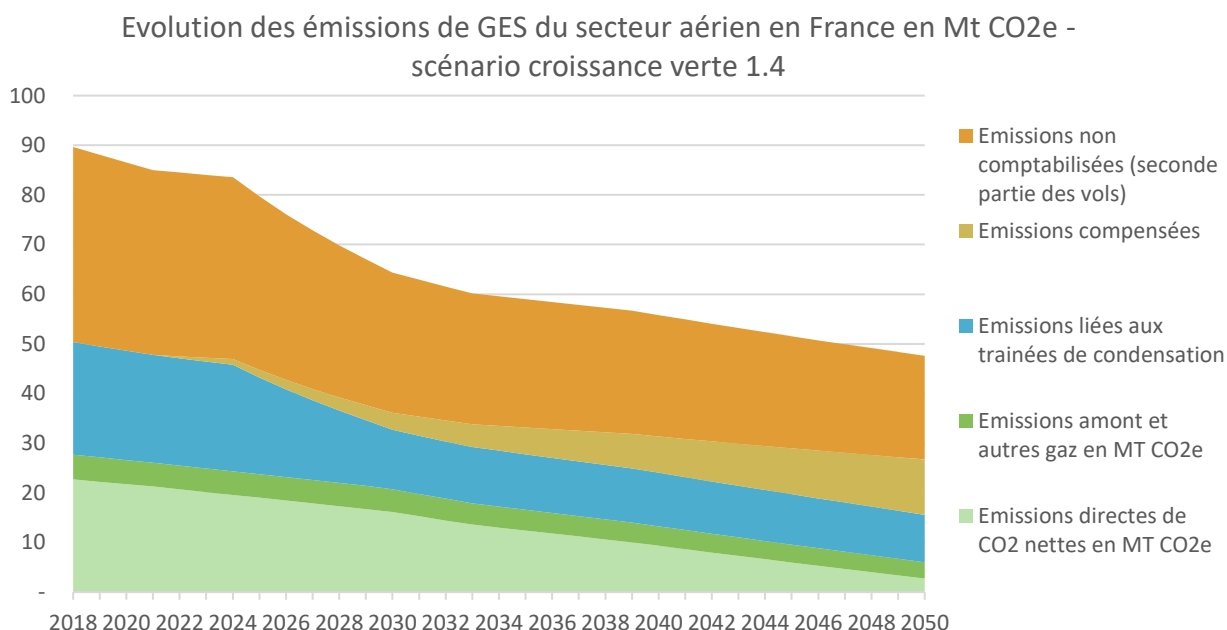
Résultats :



Sans surprise, le nombre de personnes par vol augmente moins rapidement et le nombre de mouvements totaux reste stable.

Evolution des principaux paramètres				
Année de référence		2018	2050	évolution
Nombre de passagers	<i>en millions</i>	172,40	252,53	46%
Emport moyen		109,50	170,86	56%
Nombre de mouvements	<i>en milliers</i>	1 574,43	1 478,04	-6%
Distance moyenne par vol	<i>en km</i>	1 600,00	1 600,00	0%
Conso moyenne par mvt	<i>en L</i>	10 178,89	8 053,11	-21%
Facteur émission kérosène	<i>en kg CO2e/L</i>	2,52	2,08	-18%
Coût carbone fabrication carburant	<i>en kg CO2e/L</i>	0,55	0,49	-12%
Facteur émission traînées de condensation	<i>en kg CO2e/L</i>	2,52	1,43	-43%

La diminution des émissions de GES est plus progressive et n'atteint pas les niveaux espérés. La rupture importante qui s'opère entre 2025 et 2030 est liée à des pratiques de vol qui limitent fortement les cirrus.



Les émissions par passager-kilomètre ne diminuent plus que de 55% pour atteindre 52 gCO2e par passager.km en 2050.

En cumulé, le secteur aérien émet 1 072 Mt CO2e sur la période 2020 – 2050, dont 541 Mt CO2e directes. A l'instar du scénario précédent, 168 Mt CO2e sont compensées

Uniquement sur la partie émissions directes, cela correspond à 22% de l'ensemble du budget carbone des transports tel que défini dans la SNBC et à 7% de l'ensemble du budget carbone, tous secteurs confondus.

En 2050, les émissions directes associées à l'aviation seraient de 2,7 Mt CO2e, soit 40% du budget transport. En incluant les émissions indirectes, cela donne 15,6 Mt CO2e, soit plus du double du budget carbone pour le secteur transport en 2050.

SITUATION 2050

Objectif émissions France en 2050 en MT CO2e	80,00
Objectif émissions transport France en 2050 en MT CO2e	7,00
Emissions directes associées à l'aviation en MT CO2e	2,74
Emissions totales associées à l'aviation en MT CO2e	15,58

Budget Carbone France 2020-2050 en MT CO2e	7 950,00
Budget carbone transport France 2020-2050 en MT	2 385,00
cumul des émissions directes de l'aviation en MT CO2e	540,89
Cumul des émissions totales de l'aviation en MT CO2e	1 071,55

Objectifs 2030

Objectif UE aviation 2030 par rapport à 2017	-36%
Objectif selon trajectoire SNBC 2030	-32%
Objectif scénario 1,5°C compatible en 2030	-72%
Evolution des émissions de l'aviation en 2030	-28%

Le point d'étape à 2030 n'est cependant pas satisfaisant puisque les émissions de l'aviation diminueraient de 28% alors que les différents scénarios français et européens tablent sur une baisse, respectivement de 32% et 36%. Ce scénario n'est pas compatible avec une trajectoire 1,5°C, ni même 2°C.

Conclusion :

Le scénario croissance verte 1.4 démontre l'importance fondamentale de ce paramètre d'emport moyen, puisqu'avec les projections estimées par Aéroport de Paris, même en poussant tous les curseurs au maximum, les objectifs de décarbonation du secteur aérien ne sont pas atteignables.

Scénario 3 : Scénario effet rebond

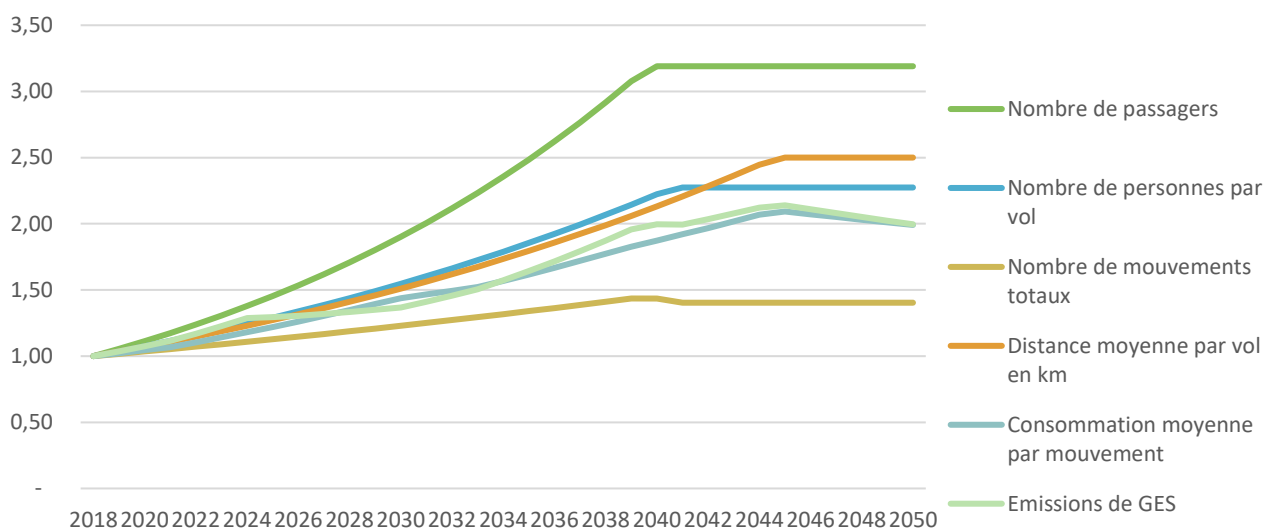
Si le scénario croissance verte tire tous les leviers techniques au maximum, il suppose également que les comportements évoluent avec une évolution plus modérée de la demande. Nous reproduisons ici un scénario effet rebond, où les progrès techniques incitent à une croissance très soutenue de l'évolution du nombre de vols.

Paramètres utilisés :

- Taux d'évolution du nombre de passagers annuels : 5,5%
- Taux d'évolution de l'emport moyen : 3,7%
- Taux d'augmentation de la distance moyenne : 3,5%
- Evolution du gain supplémentaire technique : 1,2%
- Evolution de la part des agrocarburants : 0,4%
- Evolution de la part des carburants de synthèse : 0,2%
- Optimisation de la production amont du carburant : 0,6%
- Diminution de l'effet des traînées de condensation : 9 % (plafonné à 55%)
- Nombre d'ha de forêt annuels pour compensation : 80 000
- Projet aviation du futur : 0,9% dès 2030
- Prorata du total des vols pris en compte dans le périmètre : 56,2%

Résultats :

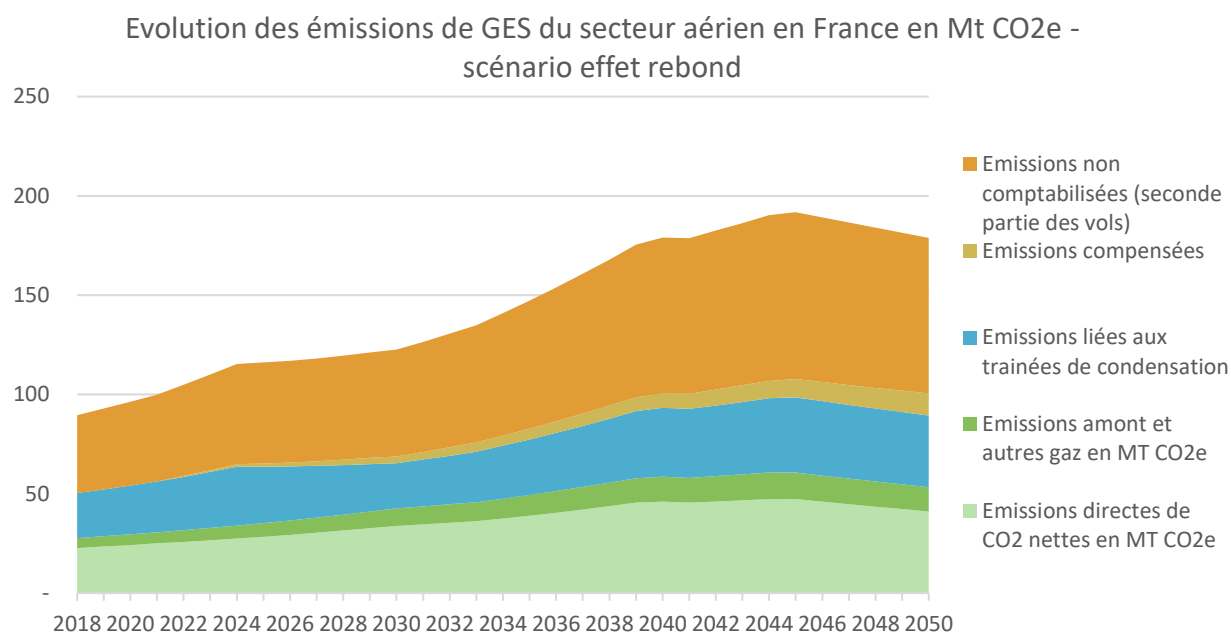
Evolution des différents paramètres (base 1 en 2018) - scénario effet rebond



Ce scénario tire tous les curseurs de la demande au maximum et atteint donc les plafonds que nous avons fixés : un emport moyen de 249 personnes, une distance moyenne de 4 000 km et un nombre de passagers annuels de 550 millions. Après donc une phase de croissance très soutenue entre 2020 et 2040, la demande stagne et les émissions commencent à diminuer.

Evolution des principaux paramètres				
Année de référence		2018	2050	évolution
Nombre de passagers	<i>en millions</i>	172,40	550,00	219%
Emport moyen		109,50	249,00	127%
Nombre de mouvements	<i>en milliers</i>	1 574,43	2 208,84	40%
Distance moyenne par vol	<i>en km</i>	1 600,00	4 000,00	150%
Conso moyenne par mvt	<i>en L</i>	10 178,89	20 256,61	99%
Facteur émission kérosène	<i>en kg CO2e/L</i>	2,52	2,08	-18%
Coût carbone fabrication carburant	<i>en kg CO2e/L</i>	0,55	0,49	-12%
Facteur émission traînées de condensation	<i>en kg CO2e/L</i>	2,52	1,43	-43%

Différents progrès techniques permettent dans un premier temps de compenser la croissance des émissions de GES qui est stable entre 2025 et 2030, avant de repartir significativement à la hausse sur la décennie suivante. Dans ce scénario, tous les efforts mis en place n'arrivent pas à compenser la croissance des émissions qui aboutissent en 2050 à une valeur 80% supérieur à la valeur actuelle.



Les émissions par passager-kilomètre diminuent de 68% pour atteindre 36 gCO2e par passager.km en 2050.

En cumulé, le secteur aérien émet 2 489 Mt CO2e sur la période 2020 – 2050, dont 1 283 Mt CO2e directes.

Uniquement sur la partie émissions directes, cela correspond à 54% de l'ensemble du budget carbone des transports tel que défini dans la SNBC et à 16% de l'ensemble du budget carbone, tous secteurs confondus.

En 2050, les émissions directes associées à l'aviation représenteraient 51% des émissions totales françaises, soit 6 fois le budget carbone du secteur transport.

SITUATION 2050

Objectif émissions France en 2050 en MT CO2e	80,00
Objectif émissions transport France en 2050 en MT CO2e	7,00
Emissions directes associées à l'aviation en MT CO2e	41,10
Emissions totales associées à l'aviation en MT CO2e	89,36

Budget Carbone France 2020-2050 en MT CO2e	7 950,00
Budget carbone transport France 2020-2050 en MT	2 385,00
cumul des émissions directes de l'aviation en MT CO2e	1 282,71
Cumul des émissions totales de l'aviation en MT CO2e	2 488,80

Objectifs 2030

Objectif UE aviation 2030 par rapport à 2017	-36%
Objectif selon trajectoire SNBC 2030	-32%
Objectif scénario 1,5°C compatible en 2030	-72%
Evolution des émissions de l'aviation en 2030	37%

Le point d'étape à 2030 est très inquiétant, puisque les émissions de l'aviation augmenteraient de 37% alors que les différents scénarios français et européens tablent sur une baisse, respectivement de 32% et 36%. Ce scénario n'est évidemment pas compatible avec une trajectoire 1,5°C, ni même 2°C.

Conclusion :

Le scénario effet rebond montre qu'agir sur l'offre ne suffit pas. Quels que soient les efforts mis en place, si la demande explose, l'aviation empêche, à elle seule, l'atteinte de tous les objectifs climatiques.

Scénario 4 : Scénario catastrophe climat

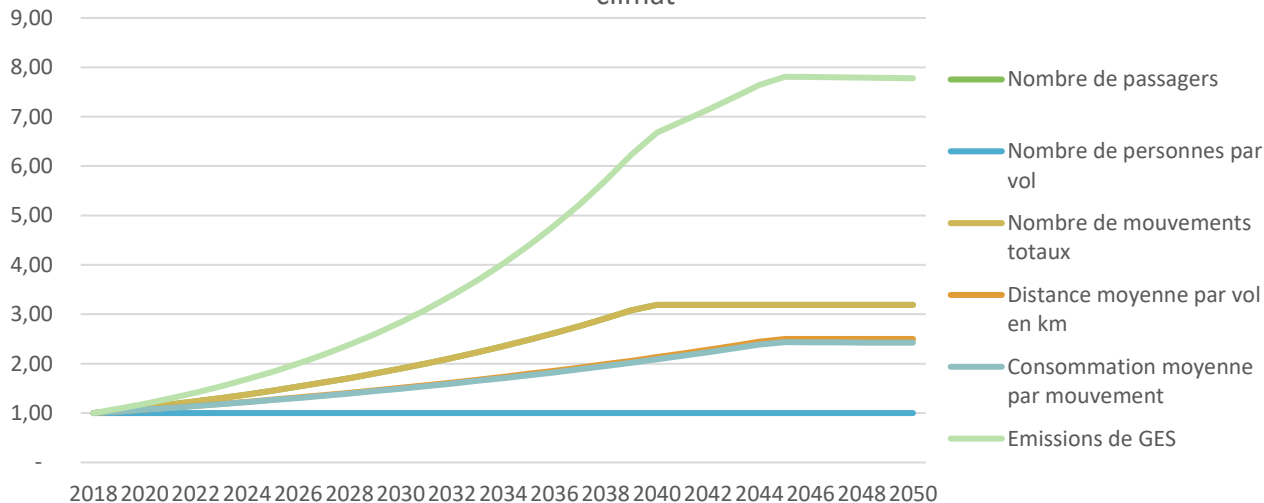
Ce 4^{ème} scénario vise à se faire peur. Il s'agit de simuler ce qu'il se passe si tous les paramètres évoluent de la pire des manières pour le climat. C'est-à-dire que les progrès techniques n'évoluent pas plus vite qu'aujourd'hui mais que la demande s'emballe.

Paramètres utilisés :

- Taux d'évolution du nombre de passagers annuels : 5,5%
- Taux d'évolution de l'emport moyen : 0,0%
- Taux d'augmentation de la distance moyenne : 3,5%
- Evolution du gain supplémentaire technique : 0,0%
- Evolution de la part des agrocarburants : 0,0%
- Evolution de la part des carburants de synthèse : 0,0%
- Optimisation de la production amont du carburant : -0,3%
- Diminution de l'effet des traînées de condensation : 0 % (plafonné à 55%)
- Nombre d'ha de forêt annuels pour compensation : -
- Projet aviation du futur : -
- Prorata du total des vols pris en compte dans le périmètre : 56,2%

Résultats :

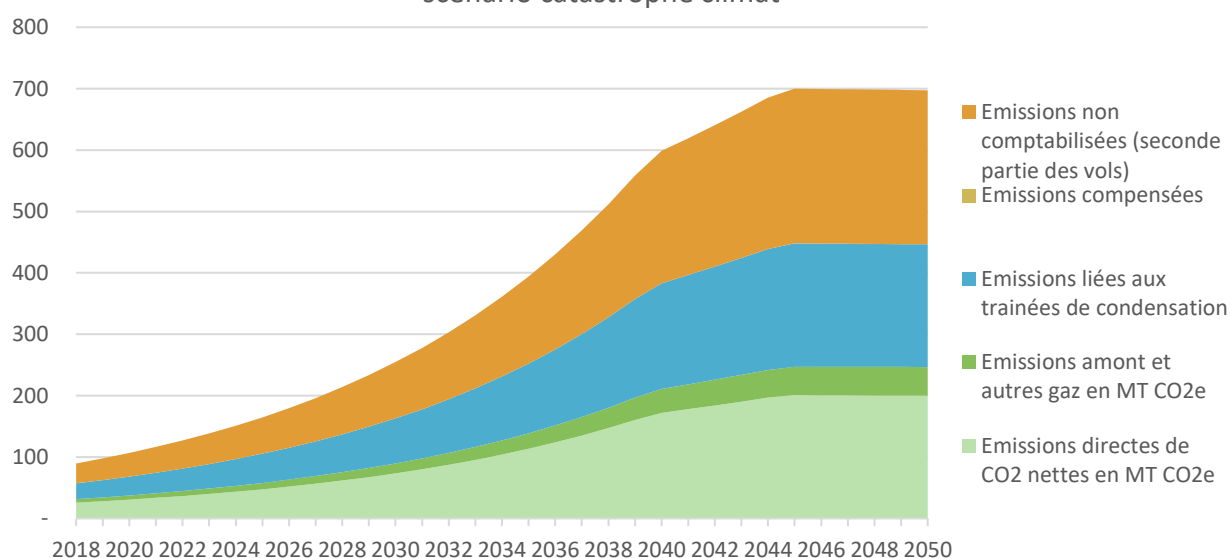
Evolution des différents paramètres (base 1 en 2018) - scénario catastrophe climat



Dans ce scénario catastrophe, le nombre de mouvements aériens triple d'ici 2040 pour se stabiliser ensuite, une fois que tous les plafonds fixés sont atteints. Les émissions de GES sont multipliées par 8 en à peine 25 ans.

Evolution des principaux paramètres				
Année de référence		2018	2050	évolution
Nombre de passagers	<i>en millions</i>	172,40	550,00	219%
Emport moyen		109,50	109,50	0%
Nombre de mouvements	<i>en milliers</i>	1 574,43	5 022,83	219%
Distance moyenne par vol	<i>en km</i>	1 600,00	4 000,00	150%
Conso moyenne par mvt	<i>en L</i>	10 178,89	24 667,64	142%
Facteur émission kérosène	<i>en kg CO2e/L</i>	2,52	2,52	0%
Coût carbone fabrication carburant	<i>en kg CO2e/L</i>	0,55	0,59	6%
Facteur émission traînées de condensation	<i>en kg CO2e/L</i>	2,52	2,52	0%

Evolution des émissions de GES du secteur aérien en France en Mt CO2e - scénario catastrophe climat



Les émissions par passager-kilomètre diminuent de 3% seulement pour atteindre 121 gCO2e par passager.km en 2050.

En cumulé, le secteur aérien émet 7 822 MT CO2e sur la période 2020 – 2050, dont 3 512 MT CO2e directes.

Uniquement sur la partie émissions directes, cela correspond à 147% de l'ensemble du budget carbone des transports tel que défini dans la SNBC et à 44% de l'ensemble du budget carbone, tous secteurs confondus. (Oui, on parle bien d'un scénario catastrophe).

En 2050, les émissions directes associées à l'aviation représenteraient 250% des émissions totales françaises.

SITUATION 2050

Objectif émissions France en 2050 en MT CO2e	80,00
Objectif émissions transport France en 2050 en MT CO2e	7,00
Emissions directes associées à l'aviation en MT CO2e	199,83
Emissions totales associées à l'aviation en MT CO2e	446,47

Budget Carbone France 2020-2050 en MT CO2e	7 950,00
Budget carbone transport France 2020-2050 en MT	2 385,00
cumul des émissions directes de l'aviation en MT CO2e	3 511,97
Cumul des émissions totales de l'aviation en MT CO2e	7 821,51

Objectifs 2030

Objectif UE aviation 2030 par rapport à 2017	-36%
Objectif selon trajectoire SNBC 2030	-32%
Objectif scénario 1,5°C compatible en 2030	-72%
Evolution des émissions de l'aviation en 2030	184%

Le point d'étape à 2030 est tout aussi catastrophique, puisque les émissions de l'aviation augmenteraient de 184% alors que les différents scénarios français et européens tablent sur une baisse respectivement de 32% et 36%. Ce scénario n'est évidemment pas compatible avec une trajectoire 1,5°C, ni même 2°C, ni d'ailleurs 3°C.

Conclusion :

Le scénario catastrophe est là pour montrer le pendant du scénario croissance verte. Il ne s'agit pas d'un scénario complètement farfelu malheureusement mais d'un scénario qui pourrait arriver si des efforts étaient mis pour favoriser l'essor de l'aviation et la qualité de service (comme un raccourcissement de la durée des vols) sans aucune prise en compte d'enjeux environnementaux.

A noter que ce scénario ressemble pour beaucoup à la situation constatée en 2018, avec une évolution du nombre de passagers de plus de 5%, une distance moyenne qui a augmenté de 2,9% et les différents paramètres de gain d'efficacité qui correspondent à la trajectoire tendancielle.

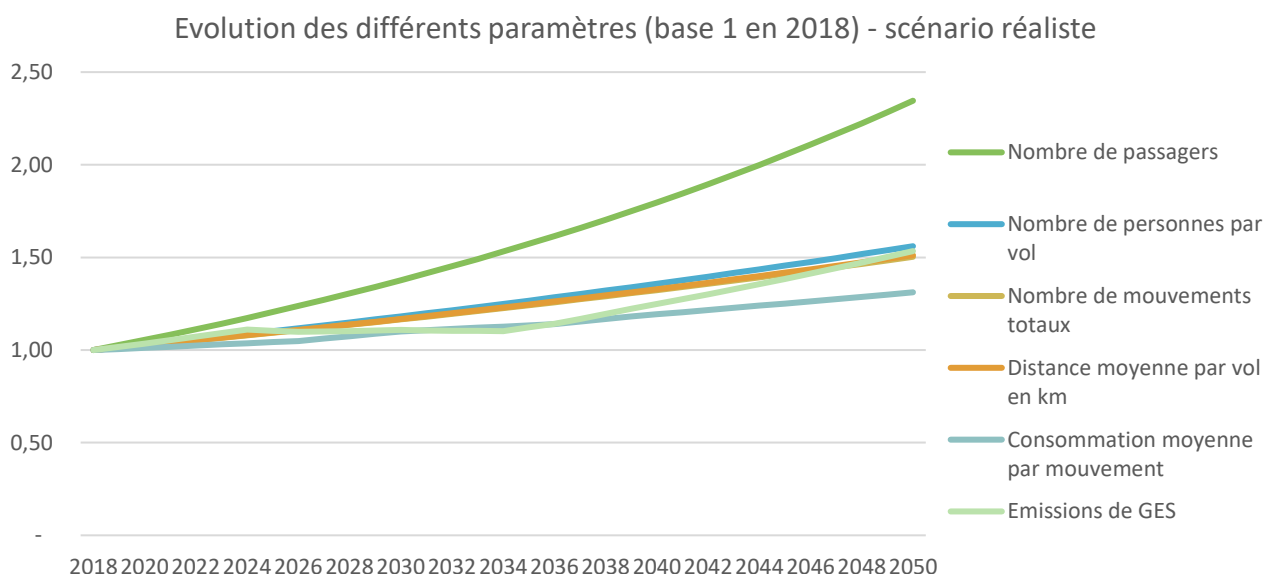
Scénario 5 : Scénario réaliste

Ce 5^{ème} scénario est un scénario que nous jugeons réaliste. Il s'agit de faire des efforts assez conséquents sur l'offre tout en maintenant une demande qui évolue selon les tendances projetées.

Paramètres utilisés :

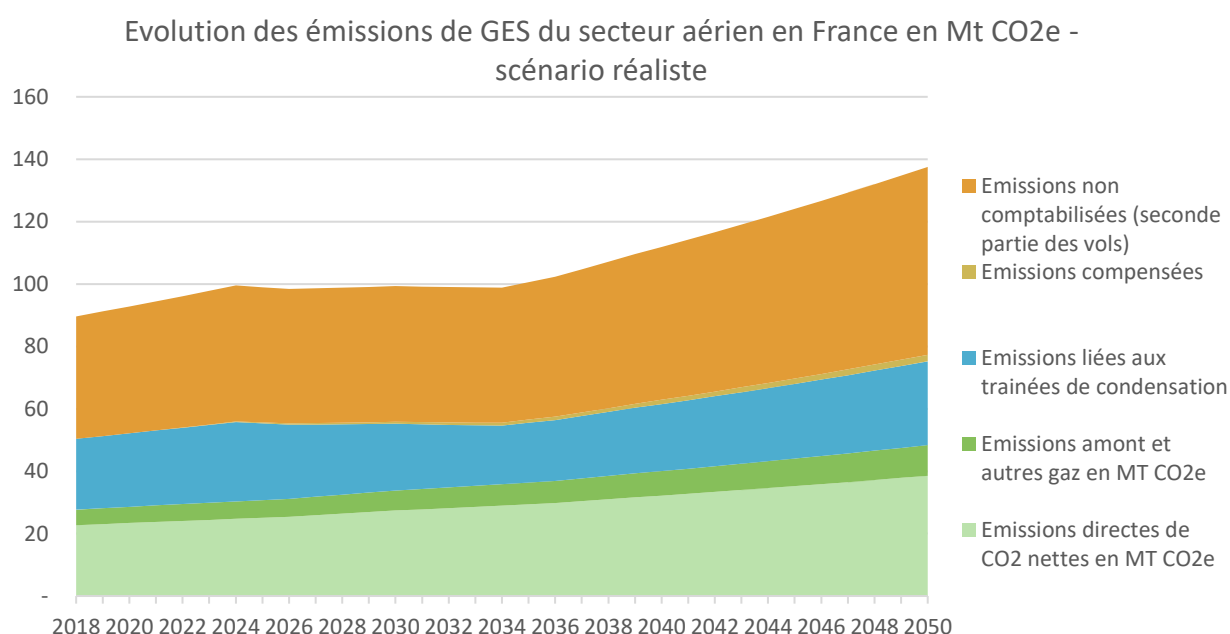
- Taux d'évolution du nombre de passagers annuels : 2,7%
- Taux d'évolution de l'emport moyen : 1,4%
- Taux d'augmentation de la distance moyenne : 1,3%
- Evolution du gain supplémentaire technique : 0,6%
- Evolution de la part des agrocarburants : 0,2%
- Evolution de la part des carburants de synthèse : 0,1%
- Optimisation de la production amont du carburant : 0,0%
- Diminution de l'effet des traînées de condensation : 5 % (plafonné à 55%)
- Nombre d'ha de forêt annuels pour compensation : 15000
- Projet aviation du futur : 0,3% dès 2040
- Prorata du total des vols pris en compte dans le périmètre : 56,2%

Résultats :



Le nombre de mouvements totaux augmente de 50% d'ici à 2050 du fait d'une augmentation du nombre de passagers plus rapide que l'évolution de l'emport moyen. Différents progrès techniques permettent de maintenir les émissions de GES stables jusqu'en 2035 mais celles-ci repartent à la hausse ensuite, l'avion du futur ne permettant pas de compenser l'évolution de la demande suffisamment rapidement.

Evolution des principaux paramètres				
Année de référence		2018	2050	évolution
Nombre de passagers	<i>en millions</i>	172,40	404,38	135%
Emport moyen		109,50	170,86	56%
Nombre de mouvements	<i>en milliers</i>	1 574,43	2 366,81	50%
Distance moyenne par vol	<i>en km</i>	1 600,00	2 418,92	51%
Conso moyenne par mvt	<i>en L</i>	10 178,89	13 350,73	31%
Facteur émission kérosène	<i>en kg CO2e/L</i>	2,52	2,29	-9%
Coût carbone fabrication carburant	<i>en kg CO2e/L</i>	0,55	0,55	0%
Facteur émission traînées de condensation	<i>en kg CO2e/L</i>	2,52	1,51	-40%



Les émissions par passager-kilomètre diminuent de 47% pour atteindre 63 gCO2e par passager.km en 2050.

Dans ce scénario, 31 Mt CO2e sont compensées et nécessitent pour cela la plantation de l'équivalent de 435 000 hectares de forêt, ce qui représente l'équivalent de la superficie des Alpes-Maritime.

En cumulé, le secteur aérien émet 1 812 Mt CO2e sur la période 2020 – 2050, dont 922 Mt CO2e directes.

Uniquement sur la partie émissions directes, cela correspond à 39% de l'ensemble du budget carbone des transports tel que défini dans la SNBC et à 12% de l'ensemble du budget carbone, tous secteurs confondus.

En 2050, les émissions directes associées à l'aviation représenteraient 48% des émissions totales françaises.

SITUATION 2050

Objectif émissions France en 2050 en MT CO2e	80,00
Objectif émissions transport France en 2050 en MT CO2e	7,00
Emissions directes associées à l'aviation en MT CO2e	38,56
Emissions totales associées à l'aviation en MT CO2e	75,20

Budget Carbone France 2020-2050 en MT CO2e	7 950,00
Budget carbone transport France 2020-2050 en MT	2 385,00
cumul des émissions directes de l'aviation en MT CO2e	921,62
Cumul des émissions totales de l'aviation en MT CO2e	1 812,07

Objectifs 2030

Objectif UE aviation 2030 par rapport à 2017	-36%
Objectif selon trajectoire SNBC 2030	-32%
Objectif scénario 1,5°C compatible en 2030	-72%
Evolution des émissions de l'aviation en 2030	11%

Le point d'étape à 2030 est inquiétant, puisque les émissions de l'aviation augmenteraient de 11% alors que les différents scénarios français et européens tablent sur une baisse, respectivement de 32% et 36%. Ce scénario n'est évidemment pas compatible avec une trajectoire 1,5°C, ni même 2°C.

Conclusion :

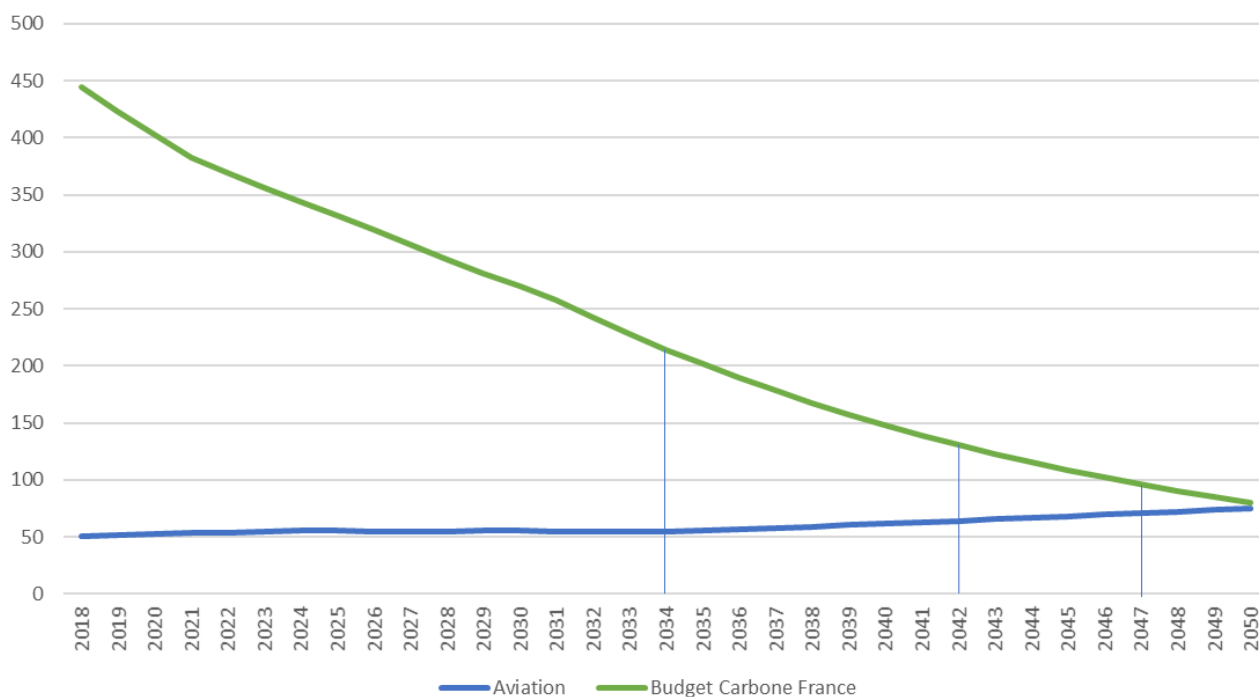
Notre perception des discours et tendances actuelles nous fait dire que ce scénario reproduit ce qui est dans l'air du temps, au moins pour la prochaine décennie.

Si la croissance des émissions de GES du secteur aérien est plus faible que ce que nous observons actuellement, les efforts mis pour déployer les agrocarburants ou carburants de synthèse et l'essor de la compensation carbone ne suffisent pas à maintenir les émissions de GES du secteur aérien à leur niveau de 2020.

Pour comprendre l'importance que pourrait prendre l'aviation, il convient de comparer ces niveaux d'émissions avec les stratégies nationales de réduction des gaz à effet de serre. Ainsi, nous avons analysé ce que le secteur de l'aviation civile représenterait en France (si on se fie au scénario "réaliste") au regard de la direction imposée par la Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC) .⁵⁸

⁵⁸ La SNBC ne prend pas en compte les émissions liées au secteur de l'aviation internationale, ce qui explique la différence entre la volonté de réduire l'impact des transports sur le climat et l'indifférence quant aux émissions du secteur aérien. L'Autorité Environnementale a pourtant pointé du doigt le manquement du ministère de la Transition Écologique et Solidaire par rapport à la mauvaise prise en compte dans la SNBC du secteur aérien dans [son avis n°2019-01 du 6 mars 2019](#).

Emissions de GES de l'aviation civile comparées aux budgets carbone de la France selon la SNBC (en Millions de tonnes CO2 equivalent)



Au regard de la SNBC, l'aviation pèsera, selon le scénario "réaliste" que nous proposons, 25% du budget carbone de la France en 2034, 50% en 2042, 75% en 2047 et représentera quasiment l'entièreté de ce budget en 2050.

Il va de soi que la poursuite de l'objectif de neutralité carbone pour le territoire français n'a de sens que si les émissions non comptabilisées dans ce calcul (aviation civile internationale), mais bien imputable à la France, sont limitées elles aussi.

Si on considère qu'il s'agit de diminuer les émissions de l'aviation internationale dans les mêmes proportions que le budget carbone annuel de la France (la SNBC prévoit une diminution de 82% des émissions d'ici 2050) alors ces émissions devront passer de 17,9Mt CO2 nt 2018 à 3,2Mt CO2 en 2050.

Pour rendre compatible l'aviation avec les engagements internationaux, il faut réduire le nombre de passagers

Les différents scénarios reproduits ci-dessus mettent à mal les possibilités d'atteintes des objectifs fixés par l'Union Européenne ou par la France. Si ces objectifs devaient être respectés malgré l'augmentation des émissions de GES du secteur aérien, cela laisserait une part extrêmement faible à l'ensemble des autres secteurs et il est peu réaliste d'octroyer plus de 80% de notre budget carbone à l'aviation. D'autant plus que les difficultés affichées ici pour rentrer dans le cadre strict des budgets carbone se reproduisent pour une bonne partie des secteurs.

Il est donc nécessaire d'aller au-delà des efforts déjà entrepris pour décarboner le secteur aérien dès maintenant. Le hasard du calendrier fait que nous discutons actuellement de plan de relance du secteur aérien. Les scénarios précédents démontrent la nécessité d'y adjoindre une directive précise visant à aller au-delà du réaliste en termes de progrès techniques et d'essor des carburants alternatifs.

Malgré cela, et si la stagnation des émissions de GES du secteur aérien peut s'envisager avec des progrès techniques conséquents et immédiats, il reste inenvisageable de faire diminuer les émissions de GES du secteur aérien sans jouer de manière conséquente sur la demande (le nombre de voyageurs).

En prenant maintenant comme premier objectif de respecter les engagements climatiques, tout en allouant à l'aviation la place qu'elle occupe actuellement dans la part des émissions de GES et celle qui lui est dévolue dans les prochaines décennies, nous construisons deux scénarios compatibles, issues du scénario réaliste, en jouant sur le paramètre du nombre de passagers.

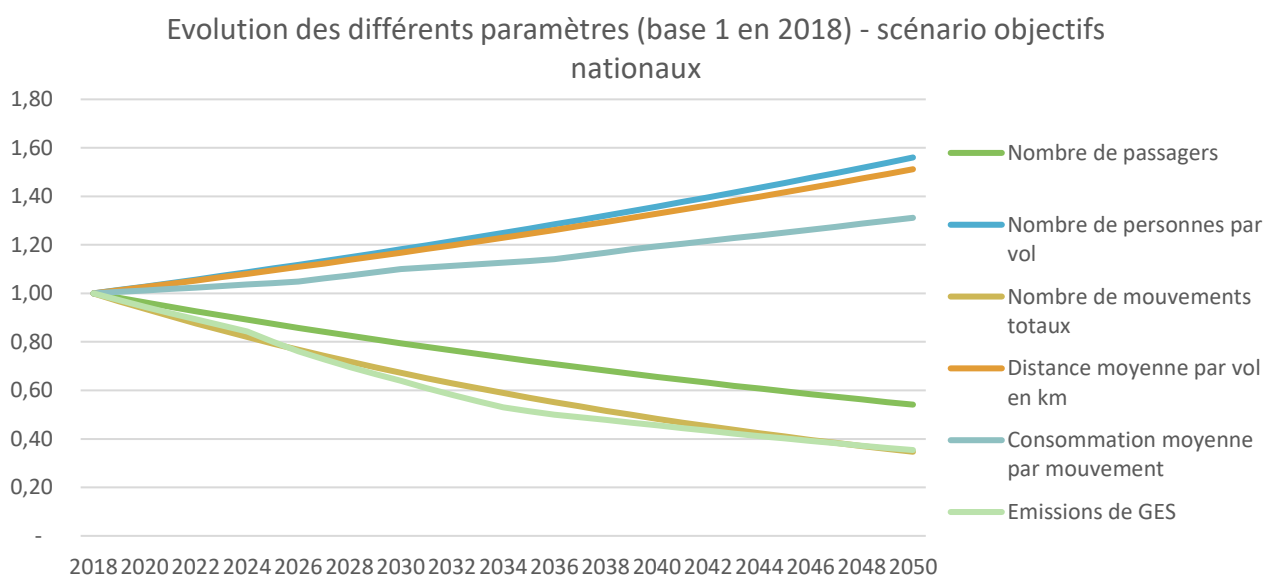
Scénario 6 : un scénario compatible avec les objectifs nationaux et européens

L'objectif visé ici est celui de répondre à l'ambition européenne, d'une diminution de 36% des émissions de GES en 2030 par rapport à 2017. Pour cela, il est nécessaire d'envisager dès maintenant une diminution du nombre de passagers de 1,9% par an.

Paramètres utilisés :

- Taux d'évolution du nombre de passagers annuels : -1,9%
- Taux d'évolution de l'emport moyen : 1,4%
- Taux d'augmentation de la distance moyenne : 1,3%
- Evolution du gain supplémentaire technique : 0,6%
- Evolution de la part des agrocarburants : 0,2%
- Evolution de la part des carburants de synthèse : 0,1%
- Optimisation de la production amont du carburant : 0,0%
- Diminution de l'effet des traînées de condensation : 5 % (plafonné à 55%)
- Nombre d'ha de forêt annuels pour compensation : 15000
- Projet aviation du futur : 0,3% dès 2040
- Prorata du total des vols pris en compte dans le périmètre : 56,2%

Résultats :

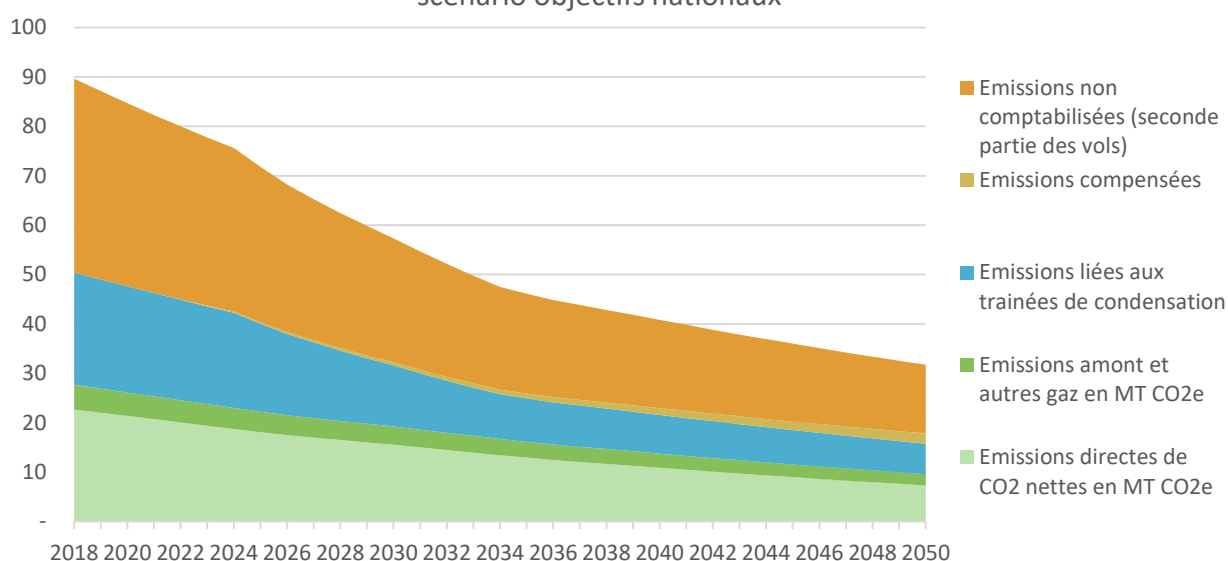


Le nombre de mouvements est dans ce scénario divisé par deux en moins de 20 ans et divisé par 3 en 2050, tout comme les émissions de GES.

Evolution des principaux paramètres

Année de référence		2018	2050	évolution
Nombre de passagers	<i>en millions</i>	172,40	93,31	-46%
Emport moyen		109,50	170,86	56%
Nombre de mouvements	<i>en milliers</i>	1 574,43	546,16	-65%
Distance moyenne par vol	<i>en km</i>	1 600,00	2 418,92	51%
Conso moyenne par mvt	<i>en L</i>	10 178,89	13 350,73	31%
Facteur émission kérosène	<i>en kg CO2e/L</i>	2,52	2,29	-9%
Coût carbone fabrication carburant	<i>en kg CO2e/L</i>	0,55	0,55	0%
Facteur émission traînées de condensation	<i>en kg CO2e/L</i>	2,52	1,51	-40%

Evolution des émissions de GES du secteur aérien en France en Mt CO2e - scénario objectifs nationaux



Tout comme pour le scénario réaliste, les émissions par passager-kilomètre diminuent de 47% pour atteindre 63 gCO2e par passager.km en 2050 et 31 Mt CO2e sont compensées.

En cumulé, avec ces paramètres intégrant une baisse du trafic aérien de 1,9% par an, le secteur aérien émet 885 Mt CO2e sur la période 2020 – 2050, dont 439 Mt CO2e directes.

Uniquement sur la partie émissions directes, cela correspond à 18% de l'ensemble du budget carbone des transports tel que défini dans la SNBC et à 6% de l'ensemble du budget carbone, tous secteurs confondus.

En 2050, les émissions directes associées à l'aviation représenteraient 9% des émissions totales françaises et l'intégralité des émissions associées au transport, en cohérence avec la trajectoire définie la SNBC.

SITUATION 2050

Objectif émissions France en 2050 en MT CO2e	80,00
Objectif émissions transport France en 2050 en MT CO2e	7,00
Emissions directes associées à l'aviation en MT CO2e	7,29
Emissions totales associées à l'aviation en MT CO2e	15,74

Budget Carbone France 2020-2050 en MT CO2e	7 950,00
Budget carbone transport France 2020-2050 en MT	2 385,00
cumul des émissions directes de l'aviation en MT CO2e	439,25
Cumul des émissions totales de l'aviation en MT CO2e	884,86

Objectifs 2030

Objectif UE aviation 2030 par rapport à 2017	-36%
Objectif selon trajectoire SNBC 2030	-32%
Objectif scénario 1,5°C compatible en 2030	-72%
Evolution des émissions de l'aviation en 2030	-36%

Le point d'étape à 2030 correspond aux différents scénarios français et européens avec une baisse de 36% des émissions de GES. Ce scénario n'est cependant pas compatible avec une trajectoire 1,5°C, ni même 2°C puisque les engagements français et européens, tout comme les engagements internationaux sont encore loin de l'objectif de l'Accord de Paris.⁵⁹

Conclusion :

S'aligner sur nos objectifs tels qu'ils sont aujourd'hui définis est possible et le secteur aérien a encore un avenir devant lui pour les 30 prochaines années. Mais cela ne peut se faire qu'en envisageant une décroissance du nombre de passagers, du nombre de mouvements et donc du nombre d'avions produits.

Cela a des conséquences sociales qui sont à anticiper dès maintenant, à la fois du côté des passagers que du personnel navigant, du personnel au sol ou des constructeurs aériens. Autrement dit, plus qu'un plan de relance, c'est un plan de transformation du secteur aérien dans son ensemble qui est à imaginer dès maintenant si nous souhaitons avoir une chance sérieuse de respecter nos engagements climatiques.

⁵⁹ Cet accord porte en son [article 2](#) l'objectif de "Contenir l'élévation de la température moyenne de la planète nettement en dessous de 2 °C par rapport aux niveaux préindustriels et en poursuivant l'action menée pour limiter l'élévation de la température à 1,5 °C par rapport aux niveaux préindustriels"

Scénario 7 : tendre vers une trajectoire +1,5°C

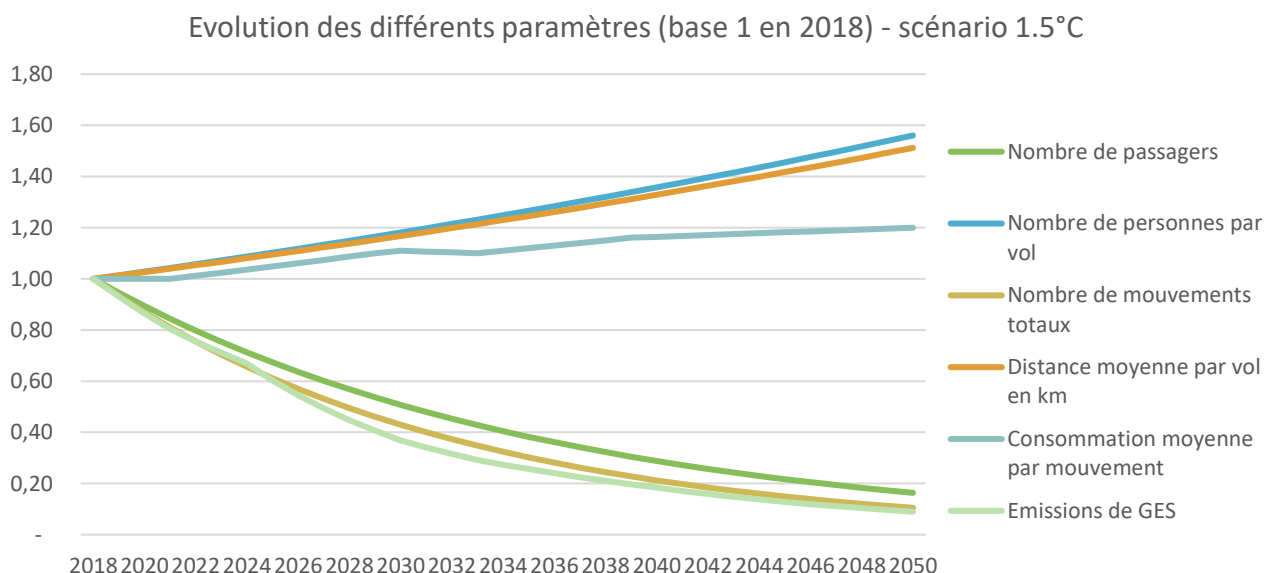
Chacun des scénarios précédemment élaborés ont permis de dessiner différentes trajectoires mais aucune d'entre elles n'était compatible avec une limitation du réchauffement climatique à +1,5°C. Atteindre un tel objectif, pourtant considéré comme nécessaire par la communauté scientifique nécessite de diminuer d'au moins 70% les émissions du secteur de l'aviation d'ici 2030.

Nous avons donc voulu proposer un dernier scénario qui se rapproche le plus possible de cette trajectoire. Pour ce faire, nous avons optimisé tous les paramètres techniques et adapté l'augmentation de la distance, l'emport ainsi que le nombre de passagers de façon à poursuivre cet objectif. Nous nous sommes cependant fixés une limite de diminution du nombre de passagers de 5,5% par an, ce qui correspond à ne pas renouveler la flotte d'aéronefs, donc à stopper dès maintenant la production de nouveaux avions.

Paramètres utilisés :

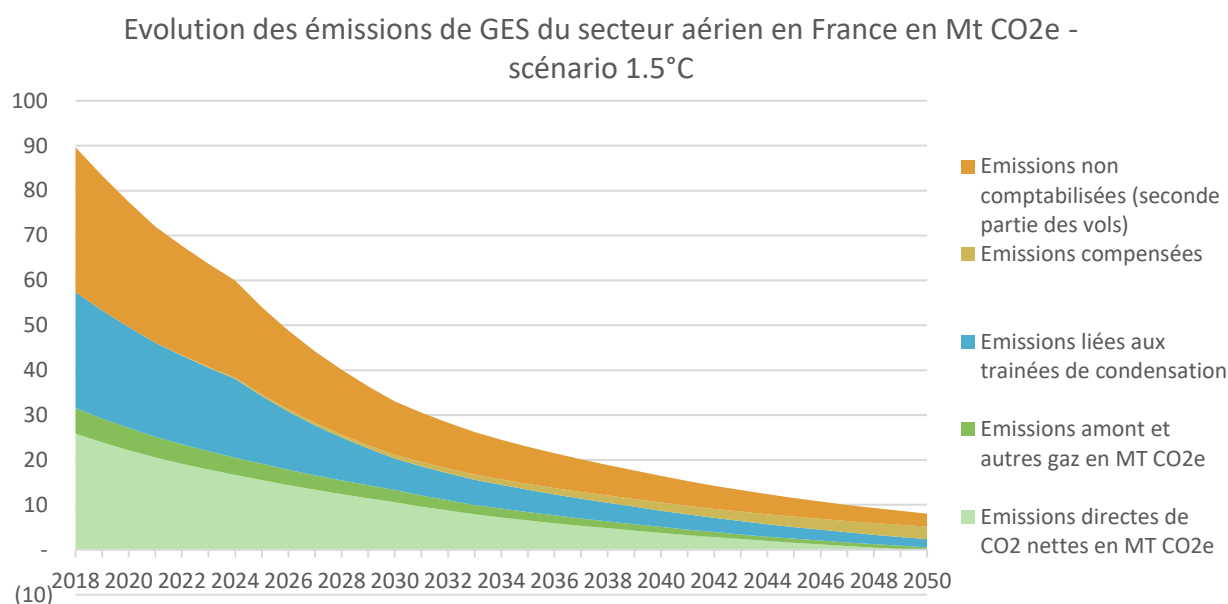
- Taux d'évolution du nombre de passagers annuels : -5,5%
- Taux d'évolution de l'emport moyen : 1,4%
- Taux d'augmentation de la distance moyenne : 1,3%
- Evolution du gain supplémentaire technique : 1,2%
- Evolution de la part des agrocarburants : 0,4%
- Evolution de la part des carburants de synthèse : 0,2%
- Optimisation de la production amont du carburant : 0,6%
- Diminution de l'effet des traînées de condensation : 9 % (plafonné à 55%)
- Nombre d'ha de forêt annuels pour compensation : 20000
- Projet aviation du futur : 0,9% dès 2030
- Prorata du total des vols pris en compte dans le périmètre : 64%

Résultats :



Le trafic a donc été réduit de 5,5% par an de manière à diminuer de 84% d'ici 2050, le nombre de mouvements aériens est divisé par deux en 10 ans et les émissions de GES suivent une trajectoire relativement similaire.

Evolution des principaux paramètres				
Année de référence		2018	2050	évolution
Nombre de passagers	<i>en millions</i>	172,40	28,21	-84%
Emport moyen		109,50	170,86	56%
Nombre de mouvements	<i>en milliers</i>	1 574,43	165,09	-90%
Distance moyenne par vol	<i>en km</i>	1 600,00	2 418,92	51%
Conso moyenne par mvt	<i>en L</i>	10 178,89	12 211,76	20%
Facteur émission kérosène	<i>en kg CO2e/L</i>	2,52	2,08	-18%
Coût carbone fabrication carburant	<i>en kg CO2e/L</i>	0,55	0,49	-12%
Facteur émission traînées de condensation	<i>en kg CO2e/L</i>	2,52	1,43	-43%



Les émissions par passager-kilomètre diminuent de 55% pour atteindre 52 gCO2e par passager.km en 2050.

42 Mt CO2e sont compensées d'ici 2050 par l'ajout de 580 000 hectares de forêt, l'équivalent d'un département français.

En cumulé, avec ces paramètres intégrant une baisse du trafic aérien de 5,5% par an, le secteur aérien émet 595 Mt CO2e sur la période 2020 – 2050, dont 292 Mt CO2e directes.

Uniquement sur la partie émissions directes, cela correspond à 12% de l'ensemble du budget carbone des transports tel que défini dans la SNBC et à 4% de l'ensemble du budget carbone, tous secteurs confondus.

En 2050, les émissions directes associées à l'aviation seraient intégralement compensées et les émissions totales représenteraient 3% des émissions de GES françaises.

SITUATION 2050

Objectif émissions France en 2050 en MT CO2e	80,00
Objectif émissions transport France en 2050 en MT CO2e	7,00
Emissions directes associées à l'aviation en MT CO2e	- 0,11
Emissions totales associées à l'aviation en MT CO2e	2,37

Budget Carbone France 2020-2050 en MT CO2e	7 950,00
Budget carbone transport France 2020-2050 en MT	2 385,00
cumul des émissions directes de l'aviation en MT CO2e	291,97
Cumul des émissions totales de l'aviation en MT CO2e	595,18

Objectifs 2030

Objectif UE aviation 2030 par rapport à 2017	-36%
Objectif selon trajectoire SNBC 2030	-32%
Objectif scénario 1,5°C compatible en 2030	-72%
Evolution des émissions de l'aviation en 2030	-63%

Plus ambitieux que les objectifs nationaux et européens actuels, il ne permet cependant pas d'atteindre les -70% en 2030. Avec une diminution de « seulement » 63%, nous pouvons dire que ce scénario tend vers une trajectoire compatible avec les 1,5°C mais ne permet pas de l'atteindre.

Conclusion :

A moins de chocs majeurs, comme la crise sanitaire actuelle, un effondrement des compagnies aériennes, une réglementation internationale extrêmement sévère ou un boycott total de l'aviation, ce secteur ne peut plus s'aligner avec une trajectoire compatible avec les 1,5°C.

La prise en compte d'optimisation technologique poussées à leur extrême et un arrêt immédiat de la production d'avions ne suffiraient pas.

Pour s'aligner avec l'Accord de Paris et ne pas dépasser 2°C de changement climatique, le secteur aérien ne peut pas non plus compter uniquement sur des progrès techniques : une diminution du nombre de passagers comprise entre 2,5% et 4% par an est nécessaire.

En d'autres termes, pour que l'aviation civile en France adopte une trajectoire de réduction des émissions nécessaire afin de viser une limitation du réchauffement climatique à +2°C, sans prendre une place déraisonnable dans les émissions territoriales françaises, il faudrait réduire de moitié le nombre de passagers annuels d'ici 20 ans maximum.

VI. Zoom sur le projet « Terminal 4 » de Roissy - Charles de Gaulle

Au vu de l'impératif de réduction des émissions de GES liées à l'aviation d'ici 10 ans (2030) et 30 ans (2050), nous avons cherché à déterminer la cohérence des pouvoirs publics vis-à-vis de ces objectifs. L'Etat s'est en effet engagé sur les questions climatiques en signant notamment l'Accord de Paris, ainsi qu'en se donnant des budgets carbone via la Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC). Ces engagements vont nécessairement dans le bon sens mais est ce que l'Etat se donne réellement les moyens de tenir ces trajectoires concernant le secteur de l'aviation ?

Les différents scénarios modélisés précédemment démontrent qu'il est peu crédible d'espérer restreindre les émissions de GES du secteur aérien sans une diminution du nombre de passagers ou a minima une diminution de l'augmentation du nombre de passagers. Pour autant, il continue d'y avoir sur notre territoire des projets d'extension d'aéroport.

Nous avons dénombré près de 15 projets d'agrandissements d'aéroports sur le territoire français. Parmi ceux-ci, les aéroports de Nice, de Bâle-Mulhouse, de Caen et bien sûr l'aéroport de Roissy - Charles de Gaulle qui prévoit de créer un quatrième terminal.

Au regard de l'impératif climatique, ces projets peuvent-ils voir le jour ou condamnent-ils d'emblée les objectifs poursuivis ?

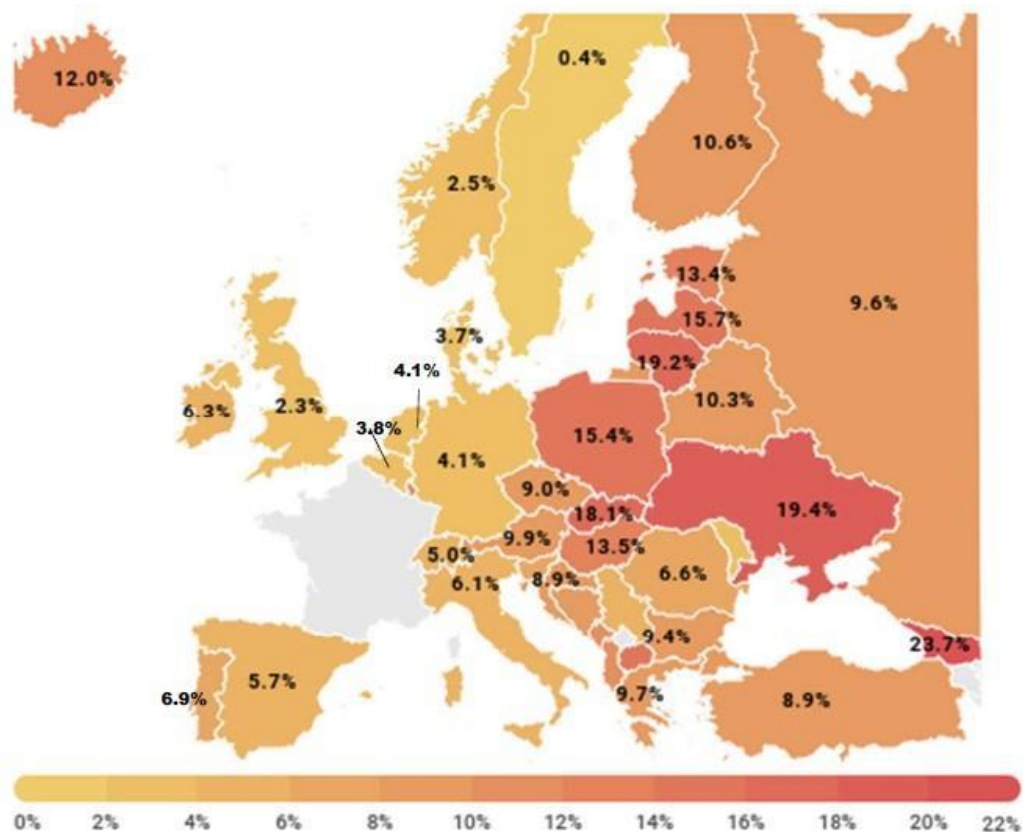
Pour répondre à cette question, nous nous sommes concentrés sur le projet "Terminal 4" de Roissy - Charles de Gaulle. Il s'agit d'un cas emblématique de l'explosion du trafic aérien révélateur des perspectives de développement du secteur. La construction du Terminal 4 devant s'achever en 2037, le projet semble contradictoire avec l'exigence d'au moins arrêter la croissance du trafic aérien, voire de le réduire.

Détail du projet de terminal 4

Le Terminal 4 de l'aéroport Roissy - Charles de Gaulle comprend, outre la construction d'une nouvelle aérogare, le développement de nouvelles installations (réseaux de dessertes routière et ferrée, voies de circulation et parkings). Il permet, sans construire de nouvelle piste, d'accueillir davantage de voyageurs sur le site existant de l'aéroport Roissy - Charles de Gaulle.

Ce projet est né de l'anticipation de l'augmentation du trafic aérien entraînant une saturation des capacités de l'aéroport. Cette tendance se retrouve également dans les aéroports de région qui voient, pour la plupart, leurs capacités maximales bientôt atteintes, empêchant ainsi le report de trafic de Roissy-CDG vers d'autres aéroports. Le croisement de ces deux facteurs fait que l'extension de Roissy - Charles de Gaulle apparaît comme étant la seule façon de permettre au trafic aérien de poursuivre son augmentation.

Cette croissance du trafic aérien s'observe dans chacun des pays de l'Union européenne (voir carte ci-dessous qui répertorie le taux d'augmentation de la fréquentation des aéroports des pays) et contraint les aéroports de type « hub » à envisager l'extension de leurs capacités.



VI.1. Quels impacts aurait le projet de Terminal 4 ?

Le nombre de mouvements d'avion s'est établi à 475 654 en 2017 et la capacité de programmation a atteint 120 mouvements par heure à la saison d'été 2017. L'aéroport dispose de 317 postes de stationnement avions dont 145 au contact des terminaux.

Voici les principales sources d'émissions aéroportuaires (ne prenant pas en compte les émissions lors des phases de vol des avions) de l'aéroport Roissy - Charles de Gaulle en 2017.

Figure : Représentation des différentes sources d'émissions aéroportuaires.

<u>Opération</u>	<u>Régime moteur</u>	<u>Durée</u>
Approche	30 %	4 min
Roulage	7 %	26 min
Décollage	100 %	0,7 min
Montée	85 %	2,2 min

Groupe ADP - Quantification des émissions de CO₂ et plan d'actions 2017

Il est clair que le groupe ADP raisonne ainsi sur un périmètre très restreint qui omet la part la plus significative des émissions de GES d'un vol, associée à sa phase de croisière. C'est d'ailleurs un élément qui est souligné dans le rapport de l'autorité environnementale⁶⁰

⁶⁰ Avis délibéré de l'Autorité environnementale sur le terminal 4 de l'aéroport Charles de Gaulle, équipements et infrastructures associés (77, 93, 95)

« Un bilan plus complet des émissions de gaz à effet de serre des plateformes du groupe ADP a été établi pour l'année 2018. Il est arrêté à 2 078 171 t_{eq}CO₂ dont 585 498 tonnes sont liées aux déplacements des passagers pour venir à l'aéroport et en partir, et 1 368 419 t aux mouvements des avions. Ce bilan est néanmoins partiel puisqu'il ne compte, outre les émissions des engins d'assistance et des moteurs auxiliaires que les phases, d'atterrissage, de roulage, décollage et montée (jusqu'à 3000 pieds soit 915 mètres) des avions. Comme l'Ae l'a déjà souligné dans de précédents avis, les émissions de gaz à effet de serre pendant la moitié de la phase de vol (dite de croisière) devraient être aussi prises en compte dans l'évaluation environnementale. »

Le tableau suivant illustre l'écart et l'importance de ces omissions. La première ligne considère l'ensemble des émissions associées à la demi-croisière, c'est-à-dire à la moitié de la distance de vol tandis que la seconde ligne reprend les émissions du cycle LTO⁶¹. Il y a un facteur 10 entre les émissions prises en compte par ADP et les émissions directement liées au trafic aérien de l'aéroport Roissy - Charles de Gaulle. D'ailleurs, le fait de se limiter aux émissions associées aux demis croisières est un choix qui peut-être questionné en lui-même du fait que l'ouverture du terminal 4 permettrait bel et bien la réalisation de vols entiers.

Bilan 2018 des émissions gazeuses Aéroport de Paris-Charles de Gaulle

Source : DGAC-DTA-SDE – TARMAAC et données DGAC
Voir définitions, conventions et commentaires pages 2 et 3

* Trafic commercial : émission CO₂/GES

	Unités	2000	2005	2010	2014	2015	2016	2017	2018
Eml. CO ₂ V2 CR	kt	9 603	11077	11 132	11 820	12 083	11 773	11 860	12 178
Eml. CO ₂ LTO	kt	845	866	862	877	895	909	902	923

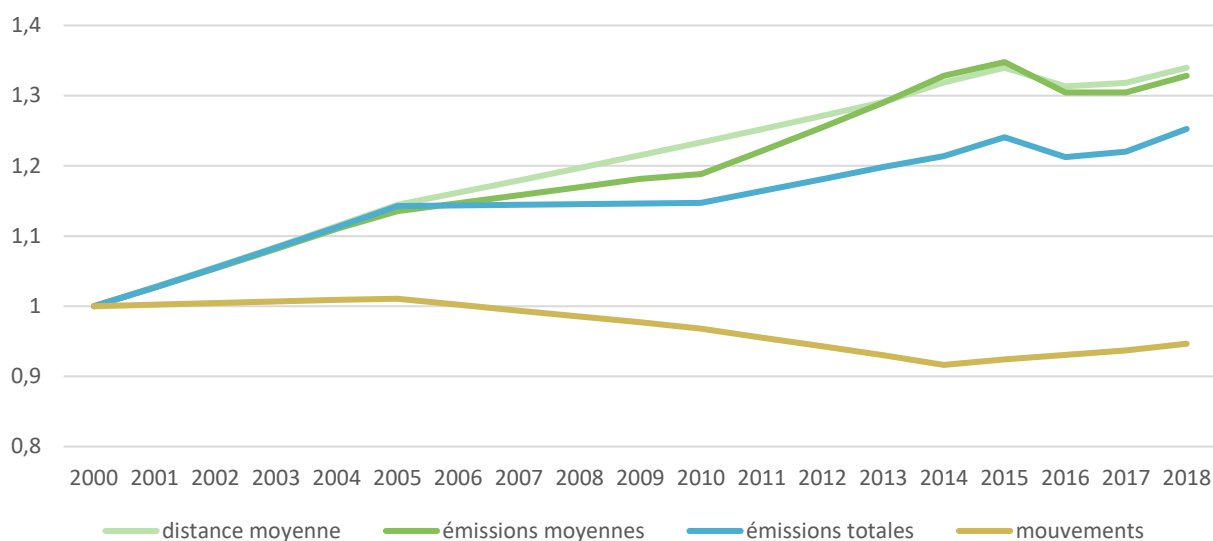
Concernant le trafic aéroportuaire, Aéroport de Paris estime que les capacités actuelles de l'aéroport Roissy - Charles de Gaulle permettraient d'accueillir 80 millions de passagers par an (contre 72,3 millions en 2018). L'extension prévue via la construction du Terminal 4 augmenterait les prévisions d'accueil de passagers entre 107 et 126 millions en 2037.

Afin de déterminer le véritable impact du Terminal 4 en matière d'émissions de GES, nous devons vérifier si notre modèle global s'applique de la même manière uniquement pour l'aéroport de Roissy - Charles de Gaulle.

De l'étude des variations des 20 dernières années, il ressort que la variation de la distance moyenne par mouvement est très proche de la variation des émissions.

⁶¹ Ce qu'on appelle « cycle LTO » vient de « Landing and Take Off » comprenant la phase d'approche, de roulage, décollage jusqu'à une altitude de 3000 pieds (= 915m) et atterrissage

Variations pour l'aéroport Charles de Gaulle (année 2000 = base 1)



Les courbes de distance moyenne et d'émissions moyennes par mouvement se suivent. L'augmentation de la distance moyenne des mouvements augmente de façon quasi identique que celle des émissions de GES des vols.

Autre constat, le nombre de mouvements stagne sur les 20 dernières années. L'évolution de l'emport moyen a compensé l'évolution du nombre de passagers.

L'augmentation de la distance moyenne des mouvements semble suivre une augmentation relativement constante depuis 20 ans. L'IATA a récemment publié un rapport sur les augmentations du trafic international révélant que celui-ci sera intensifié majoritairement aux Etats-Unis et en Chine. Il est donc très probable qu'un aéroport comme Roissy - Charles de Gaulle soit dans les premiers à profiter de l'augmentation des flux longs courriers vers ces destinations, ce qui devrait continuer de faire augmenter la distance moyenne des vols.

Les principales caractéristiques de l'aéroport Roissy - Charles de Gaulle sur les 20 dernières années ⁶²sont donc les suivantes :

- une distance moyenne qui augmente de 1,6% par an pour atteindre 2429 km en 2018 (0,8 % par an sur les 5 dernières années)
- un nombre de passagers qui augmente de 2,3% par an pour atteindre 72,3 millions en 2018 (augmentation de 3,2% par an sur les 5 dernières années)
- un emport moyen qui augmente de 2,6% par an pour atteindre 150 passagers en 2018 (même constance sur les 5 dernières années)
- un nombre de mouvements qui augmente de 0,8% par an sur les 5 dernières années après une relative diminution.
- Des émissions de GES totales qui augmentent de 1,3% par an (0,9% par an sur les 5 dernières années, toujours aussi proche de l'évolution de la distance moyenne)
- Des émissions de GES par mouvement qui augmentent de 1,6% par an (0,6% sur les 5 dernières années)

Les principales évolutions par rapport aux données nationales sont donc :

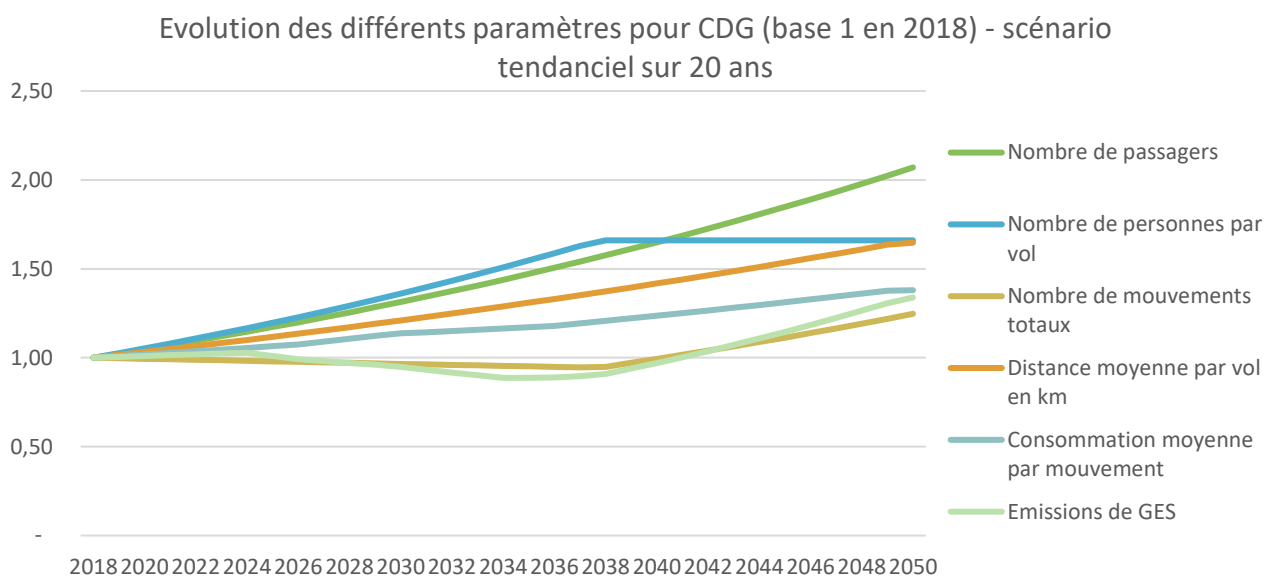
- Une évolution tendancielle de l'efficacité énergétique qui stagne au lieu de s'améliorer de 0,1% par an
- Une augmentation du nombre de passagers plus faible (2,3% contre 2,7% par an)
- Une évolution de l'emport moyen plus faible (2,6% contre 3,7% par an)

⁶² Données DGAC, émissions gazeuses 2018

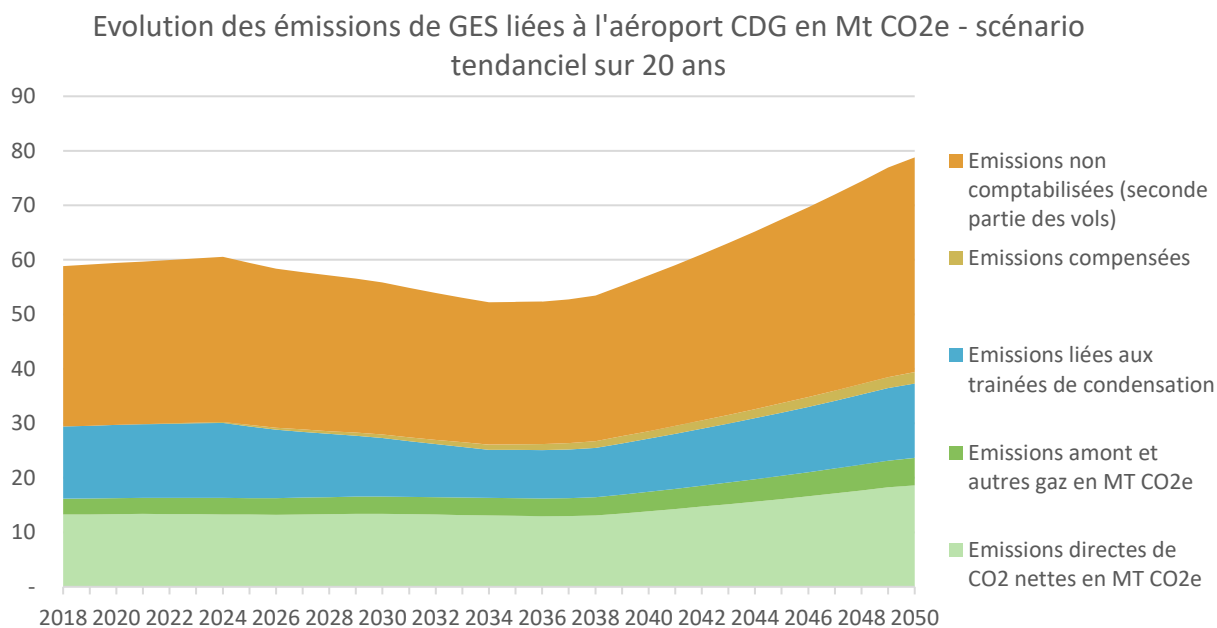
Nous ajustons donc notre modèle pour prendre en compte ces données.

VI.2. Evolution tendancielle des émissions des vols liés à l'aéroport Roissy - Charles de Gaulle.

Dans un premier temps, nous réalisons un scénario de prolongation tendancielle de ces paramètres. Pour ce qui est des paramètres d'efficacité et de développement technologique futur, nous reprenons les données du modèle "réaliste".

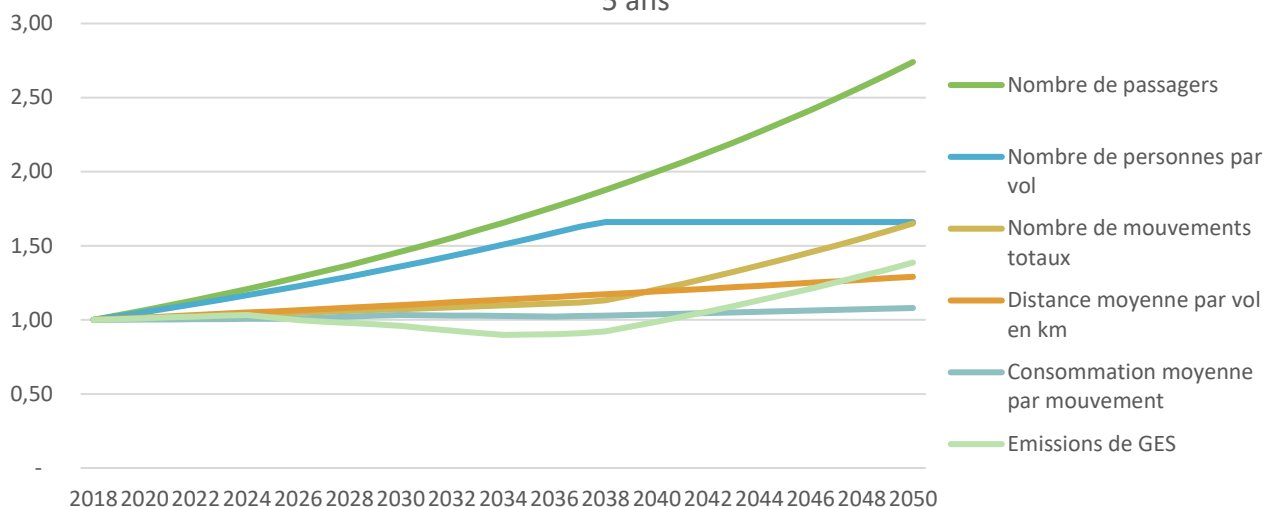


En prolongeant les données des 20 dernières années, l'emport moyen atteint en 2038 le plafond de 249 personnes par vol. Le nombre de mouvements stagne avant d'augmenter à partir de 2038 emportant avec lui les émissions de GES.

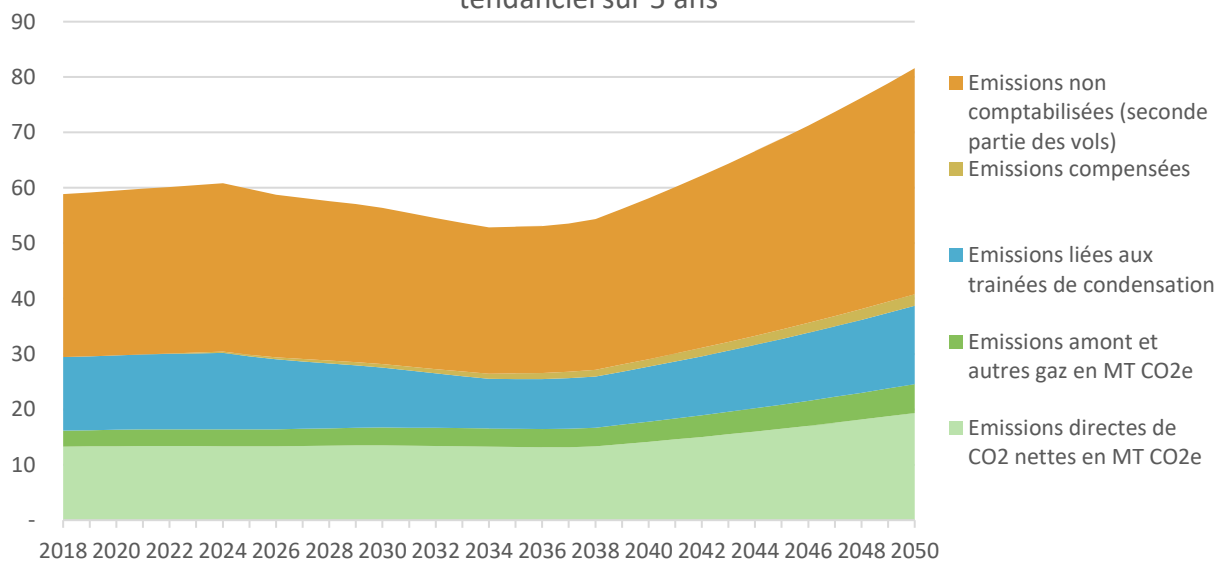


Si, en revanche, nous prolongeons uniquement les données des 5 dernières années, nous obtenons des résultats très similaires en termes d'émissions de GES, mais le nombre de mouvements augmente significativement plus.

Evolution des différents paramètres (base 1 en 2018) - scénario tendanciel sur 5 ans



Evolution des émissions de GES liées à l'aéroport CDG en Mt CO2e - scénario tendanciel sur 5 ans



Le premier constat est que, tendanciellement, et même en prenant des paramètres importants sur les gains technologiques à venir, les émissions liées à l'aéroport Charles de Gaulle augmentent et ne sont pas compatibles avec les engagements nationaux.

VI.3. Scénarios proposés par ADP

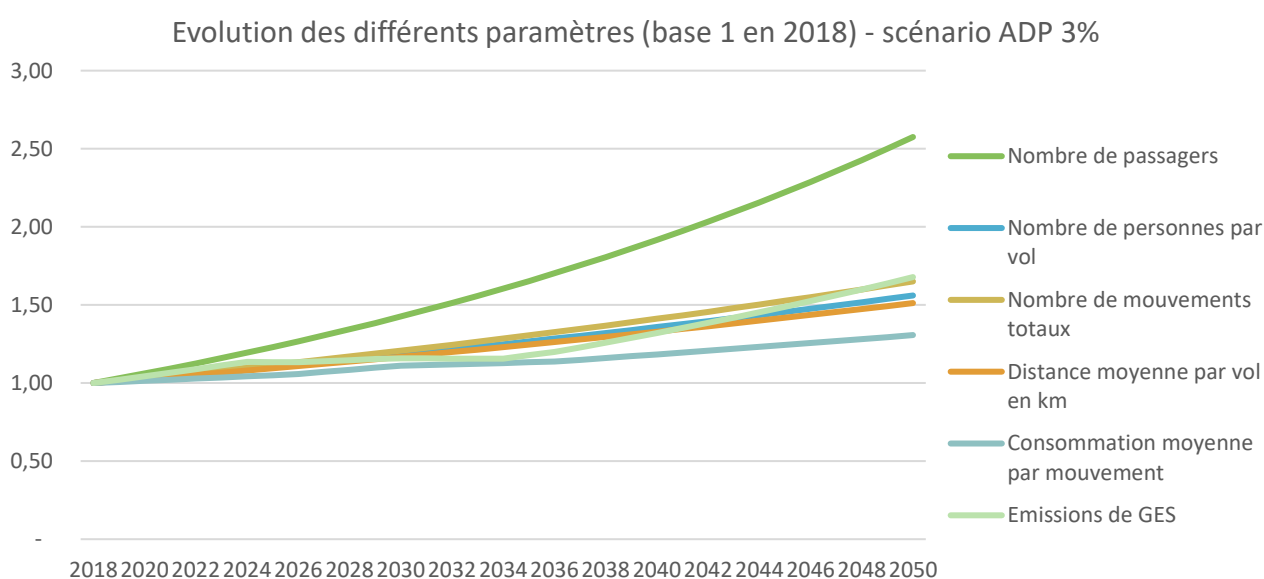
Pour justifier l'ouverture du Terminal 4, ADP annonce un nombre de mouvements d'environ 633 000 en 2037, tiré par une évolution du nombre de passagers de +2% à +3% par an et un emport moyen qui n'augmente plus que de 0,6% à 1,4% par an.

Si les évolutions projetées du nombre de passagers semblent tout à fait conformes aux tendances, la stagnation de l'emport moyen est plus surprenante puisque cette donnée à évoluer de manière constante sur les 20 dernières années.

Afin de converger vers un nombre de mouvements d'environ 633 000 en 2037, nous réalisons deux simulations différentes, une avec un taux d'évolution du nombre de passagers de 2% par an et une augmentation de l'emport moyen de 0,6% par an (scénario ADP - 3%) et une avec un taux d'évolution du nombre de passagers de 3% par an et une augmentation de l'emport moyen de 1,4% par an (scénario ADP - 2%).

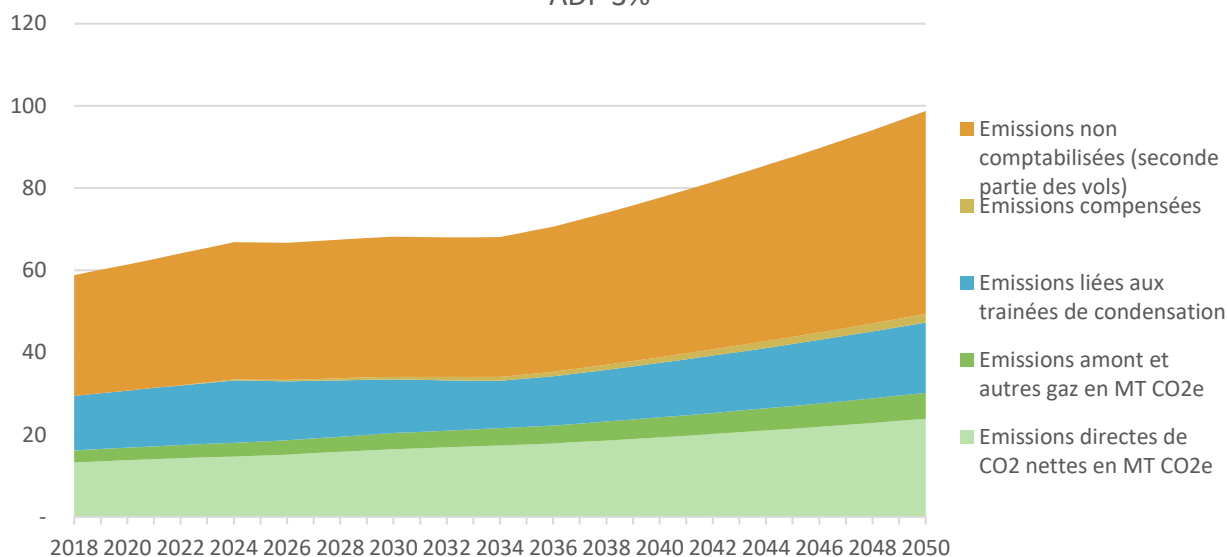
Pour ces deux simulations, nous maintenons la base de développement du scénario "réaliste" et prenons 1,3% par an comme augmentation des distances moyennes.

Les résultats sont très similaires pour les deux scénarios, avec un total d'émissions cumulées entre 2020 et 2050 légèrement supérieures pour le scénario ADP - 3% (1 113 Mt CO2e contre 1078 Mt CO2e). Ce scénario nous semble néanmoins plus conforme aux évolutions tendanciennes, tant sur l'évolution de l'emport moyen que sur l'évolution du nombre de passagers. En voici les résultats :



Evolution des principaux paramètres				
Année de référence		2018	2050	evolution
Nombre de passagers	<i>en millions</i>	72,30	186,18	158%
Emport moyen		150,00	234,05	56%
Nombre de mouvements	<i>en milliers</i>	482,00	795,47	65%
Distance moyenne par vol	<i>en km</i>	2 429,00	3 672,23	51%
Conso moyenne par mvt	<i>en L</i>	21 825,40	28 526,54	31%
Facteur émission kérosène	<i>en kg CO2e/L</i>	2,52	2,29	-9%
Coût carbone fabrication carburant	<i>en kg CO2e/L</i>	0,55	0,55	0%
Facteur émission traînées de condensation	<i>en kg CO2e/L</i>	2,52	1,51	-40%

Evolution des émissions de GES liées à l'aéroport CDG en Mt CO2e - scénario ADP 3%



Ainsi, si l'extension de l'aéroport semble justifiée par un nombre de mouvements en forte augmentation (rappelons ici qu'il s'agit de la donnée d'entrée et que ce scénario vise précisément à obtenir ce nombre de mouvements), les émissions de GES ne sont pas du tout alignées avec les objectifs nationaux de réduction des émissions de GES.

Les émissions par passager-kilomètre diminuent de 47% pour atteindre 65 gCO2e par passager.km en 2050.

En cumulé, l'aéroport Roissy - CDG émet uniquement pour les vols 1 113 Mt CO2e sur la période 2020 – 2050, dont 567 Mt CO2e directes.

En ce qui concerne uniquement la partie émissions directes, cela correspond à 24% de l'ensemble du budget carbone des transports tel que défini dans la SNBC et à 7% de l'ensemble du budget carbone, tous secteurs confondus.

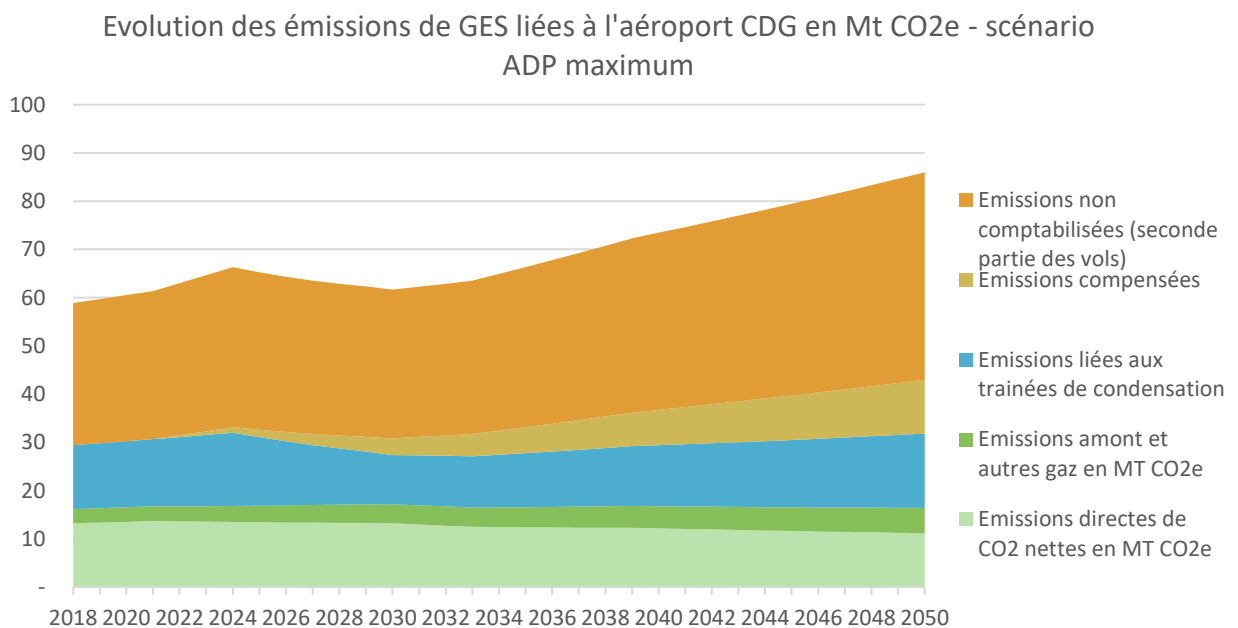
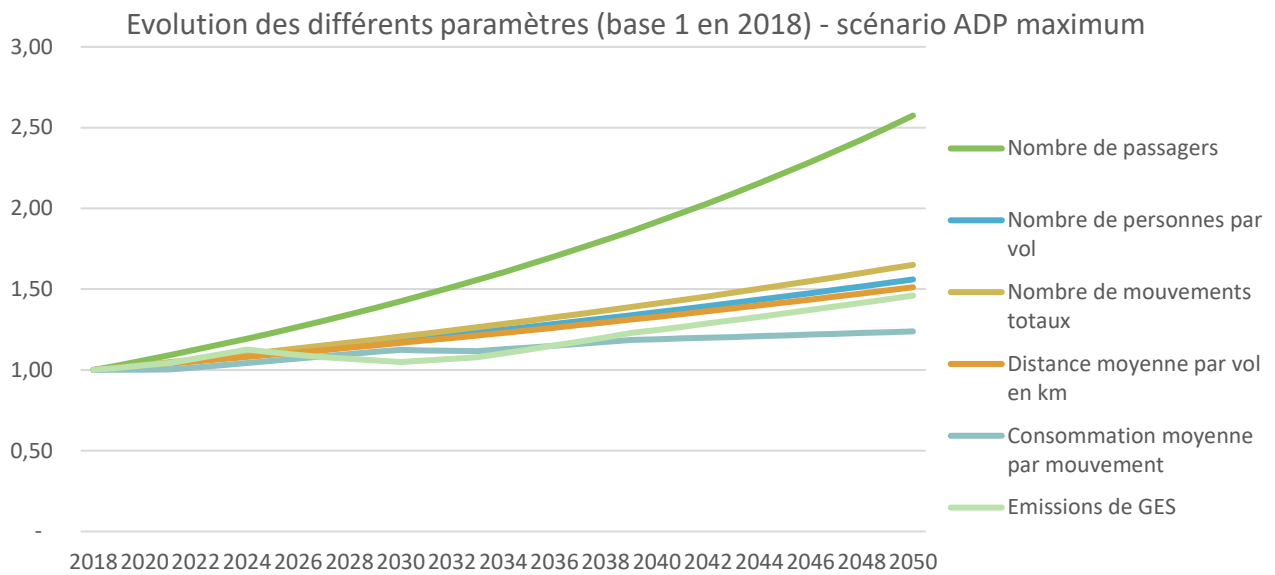
En 2050, les émissions directes associées à l'aéroport Roissy - CDG représenteraient 30% des émissions totales françaises. En prenant en compte l'ensemble des émissions associées aux vols cela représenterait près de 60% des émissions totales françaises (et nous ne prenons ici que la moitié des émissions des vols, c'est-à-dire que dans leur totalité, les vols au départ ou à l'arrivée de Roissy - CDG émettraient plus de GES que l'ensemble des autres activités sur le territoire français.

En 2030, les émissions associées à l'aéroport CDG progressent de 16%, loin de la trajectoire de réduction nationale ou européenne ainsi que de l'objectif de stagnation des émissions de GES du secteur aérien.

VI.4. Un progrès tous azimuts ne suffit pas

Les scénarios de croissance de la demande d'ADP ont été confrontés à une évolution de l'offre que nous avons qualifiée de réaliste. Afin de déterminer ce qu'il se passe dans un monde idéal, nous poussons maintenant tous les curseurs au maximum.

Ce scénario est pour l'heure hautement improbable si l'on se fie au plan de relance du secteur aérien proposé actuellement.



Grâce au recours important à la compensation carbone, ce scénario permet de faire diminuer légèrement les émissions de GES directes imputables à l'aéroport Roissy - CDG.

En cumulé, 1 043 Mt CO2e sont émises entre 2020 et 2050, dont 534 Mt CO2e directes, desquelles il est possible de retrancher 168 Mt CO2e compensées grâce à la plantation de l'équivalent de 4 départements français de forêt (uniquement pour l'aéroport de CDG).

Malgré cela, les émissions de GES ne se stabilisent qu'en 2030, ce qui est presque conforme avec l'engagement de ne pas augmenter les émissions de GES du secteur aérien, mais très loin des 32% de réductions du secteur des transport visés par la SNBC.

En 2050, l'aéroport Roissy - CDG émettrait encore 11 Mt CO₂e directement, soit 14% du budget carbone français et 160% du budget du secteur des transports. En tenant compte des émissions indirectes, l'aéroport Roissy - CDG représenterait 40% du budget carbone français.

Même en tirant tous les curseurs de progrès du secteur aérien au maximum, les projections d'ADP ne sont pas cohérentes au regard de la trajectoire de réduction des émissions de GES visée par la stratégie nationale bas carbone française.

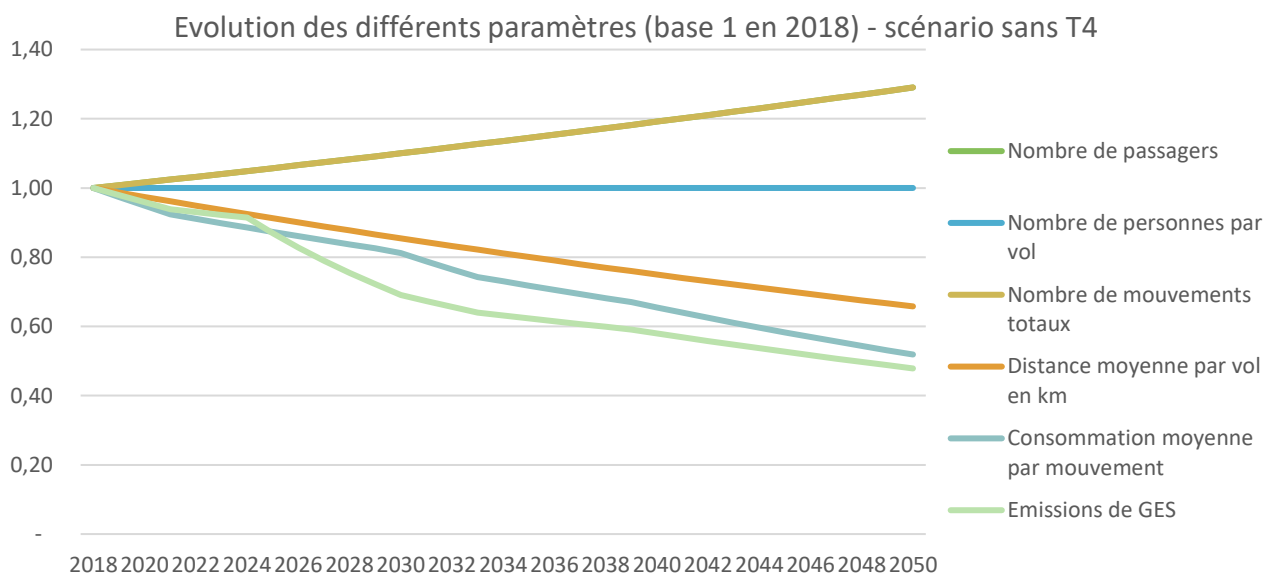
VI.5. Les limites atteintes sans construction du Terminal 4

Si les projections d'ADP ne permettent pas de respecter les engagements en termes d'émissions de GES nationales, il reste à déterminer si la construction du Terminal 4 peut tout de même se justifier dans un scénario qui serait compatible avec les engagements nationaux.

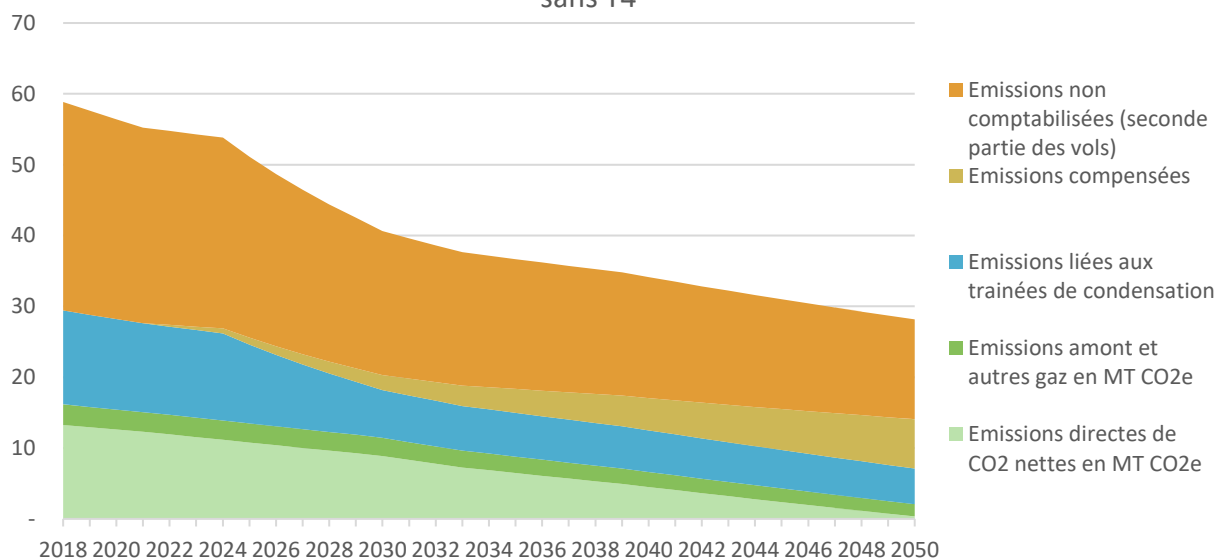
Nous essayons donc ici de construire un scénario qui permettrait de réduire de 32% les émissions de GES de Roissy - CDG en 2030, de tendre vers la neutralité carbone en 2050 et dont le nombre de mouvements dépasserait les 600 000 vols annuels.

Comme pour le scénario précédent, nous mettons tous les curseurs au maximum et neutralisons l'emport moyen, qui stagne donc à 150 personnes par mouvement.

Ces contraintes sont alors atteintes avec une évolution de 0,8% par an du nombre de passagers mais nécessitent une diminution de 1,3% de la distance moyenne des vols par an.



Evolution des émissions de GES liées à l'aéroport CDG en Mt CO2e - scénario sans T4



Avec ces valeurs, la distance moyenne par mouvement atteint en 2050 1600 km par mouvement, ce qui est la moyenne des aéroports en France. Autrement dit, la justification de la construction du T4 n'est cohérente avec la stratégie nationale bas carbone qu'à la condition que l'aéroport CDG devienne un aéroport d'envergure européenne et non plus mondiale, choix qui peut paraître assez surréaliste.

Par ailleurs, le nombre de passagers serait de 93 millions en 2050, ce qui semble loin des critères annoncés par ADP. Il paraît relativement certain que l'aéroport pourrait trouver d'autres alternatives pour gérer les quelques millions de passagers supplémentaires. Enfin, le nombre de mouvements n'atteindrait les 600 000 qu'en 2046, ce qui laisse 10 ans de marge par rapport aux projections actuelles.

VI.6. Un scénario réaliste, cohérent avec la trajectoire visée par la SNBC

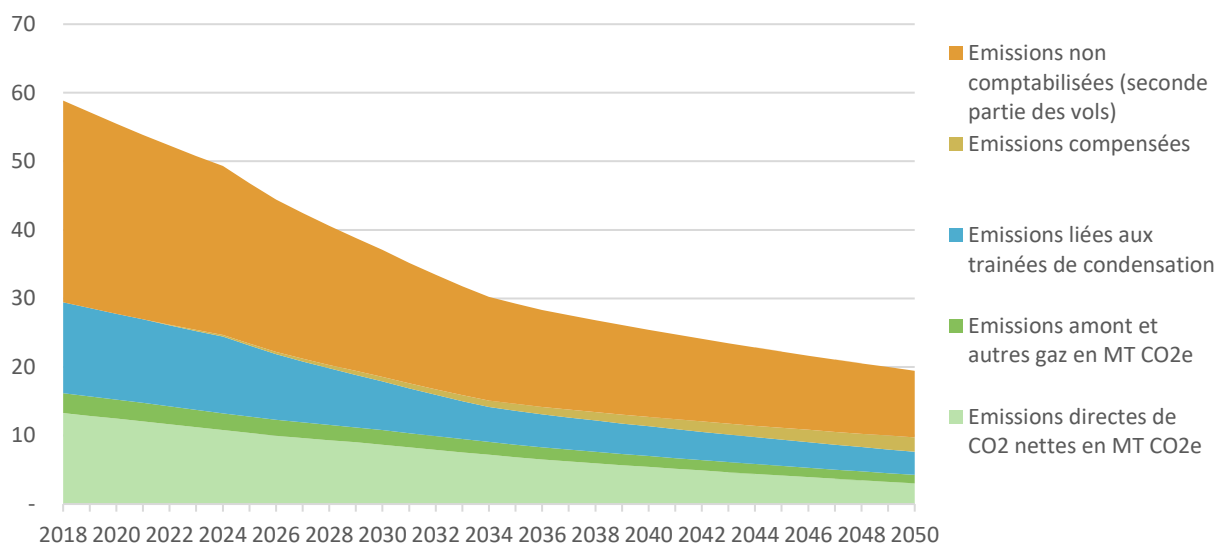
Si nous repartons du scénario "réaliste" sur l'offre, le respect des objectifs de la stratégie nationale bas carbone pour l'aéroport Roissy - CDG nécessitent de revoir les paramètres de la manière suivante :

- Augmentation de la distance de 0,8% par an, dans la continuité des 5 dernières années
- Augmentation de l'empont moyen de 1% par an, conforme aux projections d'ADP
- Diminution du nombre de passagers de 2% par an

Evolution des différents paramètres (base 1 en 2018) - scénario compatible trajectoire SNBC



Evolution des émissions de GES liées à l'aéroport CDG en Mt CO2e - scénario compatible trajectoire SNBC



Les émissions de GES diminueraient alors de 37% en 2030, conformément aux objectifs nationaux (-32%) et européens (-36%) et atterrieraient à 3 Mt CO2e en 2050, soit 43% du budget du secteur transport.

Evolution des principaux paramètres				
Année de référence		2018	2050	évolution
Nombre de passagers	<i>en millions</i>	72,30	37,88	-48%
Emport moyen		150,00	206,24	37%
Nombre de mouvements	<i>en milliers</i>	482,00	183,65	-62%
Distance moyenne par vol	<i>en km</i>	2 429,00	3 134,47	29%
Conso moyenne par mvt	<i>en L</i>	21 825,40	24 331,53	11%
Facteur émission kérosène	<i>en kg CO2e/L</i>	2,52	2,29	-9%
Coût carbone fabrication carburant	<i>en kg CO2e/L</i>	0,55	0,55	0%
Facteur émission traînées de condensation	<i>en kg CO2e/L</i>	2,52	1,51	-40%

En 2050, le nombre de passagers ne serait alors plus que de 38 millions et le nombre de mouvements de 184 000. A cet horizon temporel, ce n'est donc plus l'ouverture du T4 mais la fermeture d'un terminal existant qui semble le plus réaliste.

VI.7. Un bilan qui n'est pas complet

Si l'étude des vols au départ et à l'arrivée de l'aéroport CDG suffit à comprendre l'incompatibilité du projet de Terminal 4 avec les engagements nationaux, ceux-ci ne constituent pas le seul impact climatique de l'aéroport.

Par exemple, la construction de ce terminal entraînerait l'ouverture de nouvelles lignes aériennes aujourd'hui inexistantes. On peut donc considérer que la décision de construire le terminal aura pour effet de « créer » ces nouvelles liaisons et par conséquent, que les émissions qui en découlent seraient imputables au seul Terminal 4. Ainsi, l'entière des émissions supplémentaires seraient rattachées au projet dont la construction aura permis ces vols. Alors que la méthode de comptabilité carbone utilisée ne prend en compte que la moitié des émissions des vols (l'autre moitié étant imputable à l'aéroport de décollage ou d'atterrissage), considérer que la construction du Terminal 4 entraînerait la création de nouvelles liaisons aériennes reviendrait à comptabiliser la totalité des émissions des mouvements nouvellement créés, ce qui impacterait d'autant le T4.

Cette augmentation du trafic aérien recouvre également des impacts non négligeables liés au trafic autoroutier permettant d'acheminer les passagers de l'aéroport à leur destination finale. A cela s'ajouteraient également toutes les activités au sol pour charger les avions, acheminer les passagers, l'entretien des aéronefs, etc

De nouvelles infrastructures sont également à prévoir pour desservir l'aéroport ainsi qu'un ensemble d'activités nouvelles et, bien sûr, la construction du Terminal 4 en lui-même.

VI.8. L'incohérence de la construction du Terminal 4 au regard des impératifs de réduction des émissions de GES

En septembre 2019 à la tribune de l'ONU, le président de la République Emmanuel Macron déclarait :

« On ne peut prétendre lutter contre le réchauffement climatique et continuer à financer des infrastructures qui augmentent les émissions de CO2. Nous serons cohérents : si elles polluent, nous ne les financerons pas. »

La construction du Terminal 4 entraînera indéniablement une augmentation notable des émissions de CO2. Ne pas le construire aurait pour effet de déporter une petite partie du trafic vers les autres hubs européens bien que la conséquence première serait une augmentation des prix des billets d'avions à l'horizon 2028-2030 permettant de limiter l'augmentation de la demande des passagers.

Alors que la trajectoire nécessaire pour respecter l'Accord de Paris impose une baisse drastique des émissions de gaz à effet de serre, la construction du Terminal 4 est purement et simplement incompatible avec ces engagements.

Si la construction du Terminal 4 trouve sa justification dans le besoin d'augmenter les capacités d'accueil de passagers, on peut alors supposer qu'il s'agit là d'un impératif pouvant déroger à cette affirmation du chef de l'Etat. La Commission Nationale du Débat Public précise à ce propos :

« Aéroports De Paris a inscrit à son programme d'investissements des années à venir des opérations de densification des installations existantes et prévoit des actions opérationnelles pour mieux utiliser la capacité, y compris en dehors des périodes de pointe ; l'effet de ces actions et investissements de capacité n'est cependant pas suffisant pour traiter la demande de trafic prévue au-delà de 2028. »

Nous pourrions alors considérer que Aéroport de Paris dispose d'une marge afin d'amortir l'augmentation du trafic jusqu'en 2028 permettant ainsi de préparer la stagnation puis diminution du trafic dans son aéroport.

En poursuivant les tendances actuelles, cela permettrait donc à Aéroport de Paris de gérer 100 000 mouvements supplémentaires par an, avec une saturation de ces capacités aux alentours de 580 000 mouvements annuels.

Construire ce Terminal 4 serait donc soit un non-sens écologique en se projetant vers une augmentation continue du trafic aérien ; soit un non-sens économique puisque les infrastructures nouvellement construites seraient parfaitement inutiles.

VI.9. Les impacts d'une réduction du trafic intérieur (liaisons domestiques) grâce au développement du trafic ferroviaire sur la fréquentation des aéroports et gares parisiens

La congestion des aéroports, notamment les aéroports parisiens, peut être réduite par un report d'une partie du trafic vers le rail. Les liaisons domestiques radiales (Régions – Paris) sont les plus facilement remplaçables par une alternative ferroviaire.

Le report modal de l'avion vers le rail pour ce qui est des liaisons domestiques a déjà montré son effectivité. Le Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire pointe d'ailleurs directement le lien de causalité entre le développement du TGV et la réduction des vols internes :

« La croissance du trafic aérien français est uniquement due au trafic international, le trafic intérieur ayant baissé depuis son apogée de 2000 (26,9 millions de passagers) jusqu'au niveau de 2010 (21,7 millions), **en raison notamment du développement des TGV.** »⁶³

Alors que les vols intérieurs semblent de plus en plus remis en question dans une perspective à la fois écologique et économique, il apparaît intéressant d'estimer la réduction du trafic aérien que représenterait un arrêt de ces liaisons ainsi que la faisabilité d'un report modal vers le rail.

Chaque année, plus de 16 340 000 passagers voyagent sur des liaisons radiales (Région-Paris) et plus de 150 600 mouvements d'avions sont réalisés selon les chiffres de 2018. A la journée, cela représente 412 mouvements d'avions pour 44 767 passagers. Si l'ensemble du trafic est basculé vers les gares parisiennes en gardant l'emport moyen observé dans les TGV de 448 passagers (69% des capacités), voici les changements en termes de fréquentation supposée des gares parisiennes :

	Mouvements de trains par jour	Part des TGV en %	Nombre de TGV	Nombre de TGV supplémentaires suite au report	% d'augmentation
Gare du Nord	786	18	142	19	2,4
Gare Montparnasse	482	31	149	20	4,1
Gare de Lyon	301	69	208	27	9
Gare de l'Est	364	27	98	13	3,5
Marne la vallée	88	100	88	12	13,1
Massy	79	100	79	10	13,1

⁶³ Observatoire de l'Aviation civile - Édition 2016, Ministère de la transition écologique et solidaire, page 34

Bien évidemment, cette augmentation de la fréquentation des gares parisiennes induira la création d'un certain nombre d'emplois ainsi qu'un éventuel agrandissement des infrastructures. Nous pouvons également supposer que l'emport moyen des TGV augmentera puisque certains voyages déjà existants sauront satisfaire les voyageurs ayant délaissé l'avion.

Afin de faciliter ce report modal, voire même l'encourager, il est nécessaire de créer certaines nouvelles lignes à grande vitesse permettant de reproduire les axes correspondant aux lignes aériennes domestiques.

Le coût des infrastructures de type « Ligne à Grande Vitesse », lorsqu'il s'agit de lignes préexistantes, est largement supportable. En effet, la portion Bordeaux – Toulouse de 250 km coûterait 1,2Md€ pour être adaptée en LGV.⁶⁴ Et ce bien que, certaines contraintes liées au tracé actuel s'imposent nécessitant de réaliser une ligne nouvelle sans repartir de l'existant. Cette nouvelle ligne Bordeaux – Toulouse permettant de rouler à 320km/h a vu son coût estimé à 4,3Md€ lorsqu'on y ajoute le coût de construction de deux nouvelles gares à Montauban et Agen. La liaison Paris – Toulouse qui est aujourd'hui la ligne domestique la plus fréquentée en avion, serait alors effectuée en train en 3h11.

Le développement du train de nuit permettrait également de reporter une grande partie du trafic aérien comme ce fut le cas pour la Suède au regard de l'épisode social de la honte de prendre l'avion (+11% de passagers dans les trains de nuit au cours de l'année 2019).

A l'échelle européenne, l'utilisation des lignes à grandes vitesses par des trains de nuit, ne serait-ce que sur une partie de l'itinéraire, permettrait de desservir des destinations comme Madrid, Rome, Vienne, voire Lisbonne, Séville, Málaga, Varsovie, Copenhague etc. et ce d'autant que certaines étaient encore en service il n'y a pas si longtemps (comme le Paris-Berlin).

Selon la FNAUT⁶⁵, en conservant un temps de parcours raisonnable d'environ 8 ou 9h (départ vers 22h / 23h ; arrivée au plus tôt vers 7h), de façon à offrir une nuit complète à bord et n'excédant pas 12h / 13h (départ vers 20h ou 21h ; arrivée vers 8h ou 9h), on pourrait relier les destinations suivantes via des trains de nuits :

- Paris – Madrid.
- Paris – Séville et Málaga.
- Paris – Valencia et Alicante.
- Paris – Lisbonne et Porto.
- Paris – Rome et Naples.
- Paris – Pise et Florence.
- Paris – Vérone – Venise et Trieste.
- Paris – Bologne – Rimini – Ancona et la côte Adriatique (en saison).
- Paris – Vienne et Budapest.
- Paris – Prague.
- Paris – Berlin et Varsovie.
- Paris – Hambourg et Copenhague.

Ainsi que :

- Copenhague : 13h,
- Prague : 13h,
- Budapest : 15h,
- Varsovie : 15h

⁶⁴ Grand Projet Ferroviaire du Sud-Ouest, Aménagement ligne existante vs Construction ligne nouvelle et Maintien ligne existante, Analyse comparative des deux solutions, décembre 2010

⁶⁵ Fédération Nationale des Associations d'Usagers des Transports (FNAUT), Les transferts de trafic possibles de l'avion vers le rail, 2003

Quelles estimations pour le coût des infrastructures ?

L'avantage du train de nuit est qu'il peut circuler sur des voies déjà existantes. Le coût d'investissement concerne donc essentiellement les trains eux-mêmes, sans besoin de développer une infrastructure nouvelle.

Ainsi, l'association « Oui au train de nuit » a réalisé l'estimation suivante :

« Constituer un parc de trains de nuit incluant 750 voitures neuves ou renouvelées (pour 40 trains) pour 15 lignes nationales et un co-financement à hauteur de 33% pour 15 lignes intra-européennes coûterait de l'ordre de 1,5 Md€ »

Nombre d'unités	Matériel roulant	Prix unitaire	Investissement
600	Voitures neuves	2,1 M€ (prix ÖBB)	1260 M€
150	Voitures Corail renouvelées	0,5 M€ (prix SNCF)	75 M€
45	Locomotives	3,6 M€ (prix SNCB)	162 M€
	Total		1497 M€

66

En ordre de grandeur, il convient de rappeler que les routes représentent un coût direct de 16 Md€/an pour les collectivités (coût cumulé de 275 Md€ pour la période 1990 – 2015). Ainsi, l'investissement à consentir pour 15 lignes nationales correspond à un dixième du budget annuel des infrastructures routières.

Le ferroviaire apparaît donc comme une alternative très crédible pour accompagner la réduction du nombre de mouvements du trafic aérien en France et en Europe.

⁶⁶ Oui au train de nuit, Une investigation « Oui au train de nuit », page 40, 2020

Conclusion

Le transport aérien fait partie de nos vies, mais y occupe une place occasionnelle. Contrairement à l'automobile, nous ne pouvons pas dire que nos sociétés sont construites autour du transport aérien et deux Français sur trois prennent l'avion moins d'une fois par an. Pourtant, il s'agit d'un secteur fortement émetteur, qui représente 7,3% de l'empreinte carbone des Français. Tirées par une fréquentation en forte hausse, les émissions du transport aérien augmentent d'année en année, allant à contre sens des trajectoires de réductions nécessaires pour éviter le péril climatique.

Actuellement incompatible avec un avenir décarboné, l'aviation civile doit se transformer rapidement et massivement. Conscients de cet enjeu, les acteurs du secteur envisagent un panel de solutions qui permette de décarboner en partie le transport aérien. Malheureusement, au regard de l'enjeu climatique, la transformation de ce secteur arrive une génération trop tard. Si les améliorations techniques, bien que parfois encore très théoriques, sont indispensables, elles ne permettront pas, même dans une vision très ambitieuse, d'orienter le secteur du transport aérien vers une trajectoire compatible avec la volonté de limiter le réchauffement climatique à 2°C.

Des mesures de sobriété dans notre rapport à l'aviation sont donc indispensables. Loin de s'opposer aux progrès techniques, il s'agit d'une complémentarité nécessaire pour limiter la casse et cela doit réinterroger notre rapport à l'aviation. Si nous prenons au sérieux les engagements internationaux en matière de climat et si nous considérons que l'aviation civile doit garder une part raisonnable dans notre empreinte carbone, la fréquentation des aéroports doit diminuer rapidement et fortement. En fonction de notre capacité à développer une aviation décarbonée, le nombre de passagers doit être divisé par deux d'ici 10 à 20 ans pour se laisser une chance de rester sous 2°C de réchauffement climatique.

Cela n'empêche pas de faire le voyage de sa vie, de retrouver sa famille, de s'expatrier ou d'assurer quelques fonctions indispensables, mais cela remet fortement en cause l'aviation de masse et les déplacements rapides, loin et pour une courte durée qui constituent une partie de notre activité touristique.

En revanche, à moins de subir des chocs majeurs, le transport aérien ne peut plus s'aligner avec une trajectoire compatible avec les 1,5°C, du seul fait des émissions projetées de la flotte d'aéronefs déjà existante. Continuer de croire dans la massification du transport aérien, c'est acter la défaite de nos politiques d'atténuation et cela nécessite de penser dès maintenant des mesures d'adaptation à un monde qui va devenir de plus en plus invivable.

Sources

- ACI Europe, The impact of an airport, 2015
- Association Internationale du Transport Aérien (IATA), Communiqué n°62, Octobre 2018
- Autorité Environnementale, Avis délibéré n°2019-01 du 6 mars 2019 *Deuxième stratégie nationale bas-carbone*
- Centre de Ressources Documentaires sur l'Aménagement, le Logement et la Nature (CRDALN), *L'étalement urbain en France, synthèse documentaire*, février 2012
- Chaire Pégase, *Les Français et l'impact environnemental du transport aérien : entre mythes et réalités*, février 2020
- Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique (CITEPA), rapport Secten, édition 2019
- Commission Européenne / CE Delft : *Climate impacts for international aviation and shipping* – septembre 2004
- Conseil Général de l'Environnement et du Développement Durable (CGEDD) Rapport n°010207-01, *Aides d'État pour les aéroports de moins de 700 000 passagers*, Mars 2016
- Conseil Supérieur de l'Aviation Civile (Ministère de l'Environnement, de l'Energie et de la Mer), *Rapport sur le maillage aéroportuaire français*, Janvier 2017
- DEMOLI Yoann et SUBTIL Jeanne, *Boarding classes. Mesurer la démocratisation du transport aérien en France (1974-2008)*, Presses Universitaires de France, « Sociologie » 2019/2 Vol. 10 | pages 131 à 151
- Direction Générale de l'Aviation Civile (Ministère de la transition écologique et solidaire), *Enquête Nationale auprès des Passagers Aériens (ENPA)*, décembre 2017
- Direction Générale de l'Aviation Civile (Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire), *Les émissions gazeuses liées au trafic aérien en France en 2018*
- Direction Générale de l'Aviation Civile (Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire), *Quoi de neuf sur les grands programmes ? Modernisation technique et performance de la navigation aérienne*, DSNA, Décembre 2019
- Direction Générale de l'Aviation civile (DGAC), Service technique de l'Aviation civile (STAC), (Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire), *Le roulage « vert » sur les grandes plates-formes aéroportuaires*, Juillet 2012
- Évaluation Française des Ecosystèmes et Services Écosystémiques (EFESE), *La séquestration de carbone par les écosystèmes en France*, mars 2019
- Fédération Nationale des Associations d'Usagers des Transports (FNAUT), *Les transferts de trafic possibles de l'avion vers le rail*, 2003
- Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC), *Rapport spécial du GIEC sur l'aviation et l'atmosphère planétaire*, 1999
- Grand Projet Ferroviaire du Sud-Ouest, Aménagement ligne existante vs Construction ligne nouvelle et Maintient ligne existante, Analyse comparative des deux solutions, décembre 2010
- GROUPE ADP – Aéroport Paris-Charles de Gaulle, *Dossier d'autorisation environnementale n°4 – volet E - étude d'impact, 3.5.5.1*, 2020

- Groupe de travail « compétitivité du transport aérien français », Rapport de 2014
- Groupe de travail interministériel présidé par Jean-Pierre GIBLIN, *Maîtrise des émissions de gaz à effet de serre de l'aviation civile*, n° 2004-0217-01, mars 2005
- Haut Conseil pour le Climat, *Agir en cohérence avec les ambitions*, juin 2019
- International Council on Clean Transportation (ICCT), Anastasia Kharina, Tim MacDonald, Dan Rutherford, *Environmental performance of emerging supersonic transport aircraft*, 2018
- Ministère de l'Ecologie du Développement Durable et de l'Energie, *Les biocarburants aéronautiques en France*, Novembre 2015
- Ministère de la Transition Écologique et Solidaire, *Observatoire de l'Aviation civile* - Edition 2016
- Ministère de la Transition Écologique, *Stratégie Nationale Du Transport Aérien 2025*, 2020
- Observatoire Prospectif des Métiers et des Qualifications de l'Aérien, *Rapport EMPLOI année 2015*, édition 2016
- Oui au train de nuit, *Une investigation « Oui au train de nuit »*, 2020
- ROY Jacques, *Transport aérien : Risques, turbulences et métamorphoses*, Téoros, 23-1 | 2004
- The Shift Project, *Crise(s), climat : préparer l'avenir de l'aviation*, mai 2020
- Statista Research Department, *Nombre d'allers-retours en avion effectués par les Français durant leur vie 2015*, 25 avr. 2015
- TEOH Roger, SCHMANN Ulrich, MAJUMDAR Arnab, and STETTLER Marc E. J, *Mitigating the Climate Forcing of Aircraft Contrails by Small-Scale Diversions and Technology Adoption*, *Environmental Science & Technology* 2020 54 (5), 2941-2950
- The World Bank, Development Research Group, Environment and Energy Team, *Calculating the Carbon Footprint from Different Classes of Air Travel*, 2013
- Union des Aéroports Français, *Résultats d'activité des aéroports français*, 2018