

Référentiel ISAE-SUPAERO

AVIATION ET CLIMAT

SYNTHÈSE

Septembre 2021



Scott Delbecq, Jérôme Fontane, Nicolas Gourdain,
Hugo Mugnier, Thomas Planès et Florian Simatos



AVIATION ET CLIMAT

SYNTHÈSE

Septembre 2021

Ce document est issu de l'[ISAE-SUPAERO](#), une école d'ingénieurs française spécialisée dans le secteur aéronautique et spatial. Il s'agit du résumé d'un rapport plus complet intitulé [Référentiel ISAE-SUPAERO Aviation et Climat](#), qui a pour vocation de fournir des éléments scientifiques utiles à la compréhension des enjeux sur l'aviation et le climat. Ce résumé en reprend les principaux résultats et conclusions.

Le travail effectué s'appuie sur la littérature scientifique et les données les plus récentes disponibles, données dont les séries temporelles s'arrêtent pour la plupart en 2018. Les références sont omises dans ce résumé, hormis pour les figures issues directement d'autres travaux. La lectrice et le lecteur intéressés sont invités à consulter la version complète du référentiel, ainsi que la feuille de calcul contenant les données et les calculs effectués dans le cadre de ce rapport. Les sections du référentiel correspondant aux différentes parties de ce résumé sont indiquées entre crochets dans les différents sous-titres.

Le référentiel est le fruit d'un travail collectif de six auteurs : Scott Delbecq, Jérôme Fontane, Nicolas Gourdain, Hugo Mugnier, Thomas Planès et Florian Simatos. Il a été coordonné par Florian Simatos et a été soumis à un processus de relecture spécifique, intégrant à la fois du personnel de l'ISAE-SUPAERO et des chercheurs extérieurs issus de différents instituts. Il est mis à disposition sous licence Creative Commons CC-BY-SA et a vocation à évoluer, pour apporter des corrections ou compléter des aspects manquants. Vous pouvez faire remonter tout commentaire à l'adresse :

contact-referentiel@isae-supero.fr

Référentiel ISAE-SUPAERO Aviation et Climat. Version 1.0.

S. Delbecq, J. Fontane, N. Gourdain, H. Mugnier, T. Planès et F. Simatos, 2021.

<https://doi.org/10.34849/76rd-c592>



MESSAGES CLÉS



Impact climatique de l'aviation : des estimations qui dépendent du périmètre

L'aviation contribue à l'accroissement du réchauffement climatique via ses émissions de CO₂ et plusieurs effets non-CO₂ comme les traînées de condensation. L'évaluation de l'impact du secteur aérien peut se limiter aux seules émissions de CO₂, ou bien considérer l'ensemble des effets. Dans le premier cas, l'aviation commerciale a été responsable de 2,6 % des émissions anthropiques mondiales de CO₂ en 2018. Si l'on considère l'ensemble des effets (CO₂ et non-CO₂), l'aviation commerciale a représenté 5,1 % de l'impact climatique sur la période 2000-2018.

Effets non-CO₂ : des stratégies prometteuses

Les stratégies spécifiques de réduction des effets non-CO₂ représentent un levier majeur pour limiter l'impact climatique de l'aviation. En raison de la courte durée de vie des effets non-CO₂, ces stratégies peuvent être efficaces rapidement. Même si des travaux de recherche sont encore nécessaires pour réduire les incertitudes, ces stratégies pourraient être déployables à brève échéance. Néanmoins, ces mesures ne peuvent pas se substituer aux efforts de réduction des émissions de CO₂ du secteur.

Effets CO₂ : des opportunités technologiques limitées à court terme

D'ici 2050, des solutions de rupture permettent d'envisager un avion bas-carbone. À plus court terme, pour diminuer les émissions de CO₂ dans les délais impartis par l'urgence climatique, les seuls leviers matures sont les améliorations incrémentales de l'efficacité des avions et l'utilisation des biocarburants. Néanmoins, les améliorations incrémentales sont en passe d'atteindre des limites technologiques, alors que les contraintes de disponibilité énergétique, de capacité de production et de concurrence sur les usages risquent de limiter la disponibilité des biocarburants.

Un arbitrage nécessaire entre le niveau de trafic et la part du budget carbone mondial allouée au secteur aérien

Hormis les leviers technologiques et opérationnels, le niveau de trafic et la part du budget carbone mondial allouée à l'aviation sont les deux paramètres qui déterminent la durabilité d'une trajectoire pour le secteur aérien. Leur valeur doit être fixée par des décisions d'ordre politique. Les limites sur la capacité du secteur aérien à diminuer rapidement ses émissions de CO₂ impliquent que, si le trafic croît au rythme envisagé par l'industrie aéronautique, alors il consommera une part plus importante du budget carbone que sa part actuelle des émissions, nécessitant ainsi que d'autres secteurs d'activité réduisent leurs émissions plus rapidement que la moyenne.

Des incertitudes sur la disponibilité énergétique

La décarbonation des carburants pour l'aviation pourrait être limitée par la disponibilité en ressources énergétiques bas-carbone. Leur utilisation massive pourrait alors entraîner un déplacement de problème environnemental, notamment lié à l'usage des sols. De façon générale, il est nécessaire de penser la transition du secteur aérien de manière systémique dans le cadre des limites planétaires.



CONTEXTE

SOMMAIRE

Contexte	4
Impact climatique de l'aviation	5
Décomposition de Kaya	7
Améliorer l'efficacité énergétique	8
Décarboner le carburant	10
Scénarios durables : arbitrage entre trafic et budget carbone	12
Effets non-CO ₂	15

Positionnement du rapport

À mesure que les conséquences du réchauffement climatique se font plus pressantes, le débat se polarise autour de l'avenir du secteur aérien. Alors que de nombreux rapports institutionnels et issus d'organismes privés se sont récemment penchés sur la question, l'objectif du référentiel Aviation et Climat de l'ISAE-SUPAERO est de fournir à chacun, à partir de notre position de scientifiques, les éléments nécessaires à la construction d'opinions éclairées sur ce sujet, aussi objectivement que possible. Ce document propose donc un état de l'art de la littérature scientifique sur l'impact climatique de l'aviation et sur les leviers envisagés pour le réduire, et analyse des scénarios de transition du secteur aérien dans le cadre du respect de l'accord de Paris.

Réchauffement climatique [chapitre 1]

Dans son sixième rapport d'évaluation publié en 2021, le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC) a conclu à une influence sans équivoque des activités humaines sur le réchauffement de l'atmosphère, des océans et des terres. Entre les périodes 1850-1900 et 2011-2020, la température moyenne a augmenté de 1,09 °C, dont +1,07 °C dus aux activités humaines. Les émissions anthropiques de gaz à effet de serre, en particulier le CO₂, sont la principale cause de la hausse du forçage radiatif effectif (ERF), qui est l'indicateur utilisé pour quantifier l'impact climatique des activités humaines.

en milliards de tonnes de CO₂ par an (GtCO₂/an)

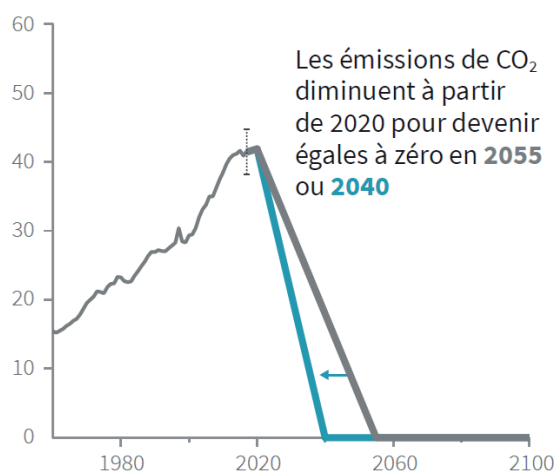


Figure 1 : Trajectoires schématiques de la baisse des émissions de CO₂ nécessaire pour limiter le réchauffement climatique à +1,5 °C, la trajectoire bleue augmentant les chances de réussite (Rapport spécial 1,5 °C du GIEC).

En plus de mesures d'adaptation à ce réchauffement, des stratégies d'atténuation, notamment de réduction des émissions de gaz à effet de serre, doivent être mises en place pour limiter l'augmentation de la température et ses conséquences. Dans ce contexte, l'accord de Paris vise à contenir l'élévation de la température moyenne de la planète nettement en dessous de +2 °C par rapport aux niveaux préindustriels et à poursuivre l'action menée pour limiter l'élévation de la température à +1,5 °C. Pour atteindre ce dernier objectif, les émissions de CO₂ doivent radicalement changer de tendance comme illustré sur la figure 1. Ainsi, les scénarios du GIEC décrivent une décroissance des émissions de CO₂ de l'ordre de 7 % par an pour limiter le réchauffement à +1,5 °C, alors qu'elles ont crû à un rythme de 1,2 % par an entre 2010 et 2019.

IMPACT CLIMATIQUE DE L'AVIATION



Effets CO₂ et non-CO₂ [section 2.1]

L'aviation contribue à l'accroissement du réchauffement climatique par de multiples mécanismes illustrés sur la *figure 2* et classés en deux catégories.

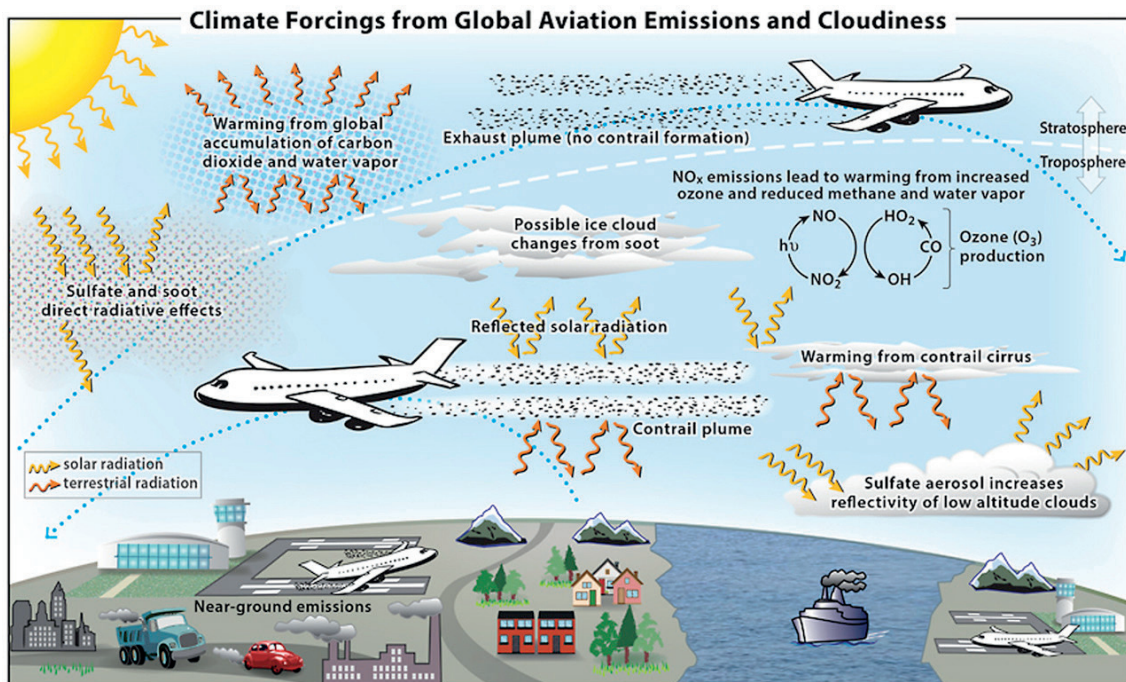


Figure 2 : Aperçu schématique des effets CO₂ et non-CO₂ de l'aviation (Lee et al.).

D'une part, les effets CO₂ correspondent au renforcement de l'effet de serre induit par les émissions de CO₂, provenant principalement de la combustion et de la production du kérosène. D'autre part, les effets non-CO₂, au nombre de cinq, englobent tous les autres impacts climatiques de l'aviation. Certains sont réchauffants et d'autres refroidissants : au total, ils génèrent un réchauffement. Ils incluent les effets des effluents moteur hors CO₂ (notamment NO_x, suie et vapeur d'eau) ainsi que les effets dus aux cirrus induits par les traînées de condensation, traînées représentées sur la *figure 2* par *Contrail plume*.

Évaluation de l'impact climatique de l'aviation [section 2.2]

L'évaluation de l'impact climatique du secteur aérien dépend du périmètre considéré :

- prise en compte ou non des effets non-CO₂ ;
- restriction à l'aviation commerciale (responsable d'environ 90 % de la consommation de kérosène) ou bien extension à la globalité du secteur aérien incluant également l'aviation militaire et l'aviation privée ;
- comptabilisation du CO₂ émis uniquement pendant le vol (combustion) ou celui attribuable à l'ensemble du cycle de vie du secteur, incluant aussi la production du kérosène (qui représente de l'ordre de 20 % des émissions liées à la combustion), des avions et des infrastructures aéroportuaires ;
- choix de la fenêtre temporelle sur laquelle on mesure l'impact, par exemple depuis le début de la période industrielle (1750) ou sur une période plus récente.

Le *tableau 1* donne l'évaluation de l'impact climatique du secteur aérien pour plusieurs périmètres résultant chacun d'une combinaison différente de ces choix.

Période	CO ₂		ERF	
	GtCO ₂	% des émissions	mW m ⁻²	% de l'ERF anthropique
Aviation globale, combustion seule				
1750-2018	32,9	1,4 %	100,9	3,8 %
2000-2018	15,1	2,1 %	44,2	4,8 %
2018	1,0	2,4 %	2,5	—
Aviation commerciale, ensemble du cycle de vie				
2000-2018	16,0	2,3 %	47,6	5,1 %
2018	1,1	2,6 %	4,2	—

Tableau 1 : Évaluation de l'impact climatique de l'aviation pour différents périmètres.

Les effets CO₂ sont évalués par la quantité de CO₂ émise. En 2018, les émissions dues à la combustion du kérosène utilisé par l'aviation globale ont représenté 2,4 % du total anthropique, et les émissions de l'aviation commerciale sur l'ensemble du cycle de vie ont représenté 2,6 % du total.

Lorsque les effets non-CO₂ sont pris en compte, l'évaluation de l'impact est alors mesurée par l'estimation de la valeur du forçage radiatif effectif (ERF) induit par le secteur. Entre 1750 et 2018, période habituellement considérée dans la littérature scientifique, l'aviation globale, en ne considérant que les effets CO₂ liés à la combustion, a ainsi été responsable de 3,8 % de l'ERF anthropique. En considérant le même périmètre mais sur une période plus récente allant de 2000 à 2018, on trouve que l'aviation a été responsable de 4,8 % de l'augmentation de l'ERF anthropique. Si l'on change de périmètre et que l'on considère la quantité de CO₂ émise sur l'ensemble du cycle de vie par l'aviation commerciale, alors sa part dans l'augmentation de l'ERF anthropique s'élève à 5,1 % entre 2000 et 2018. Contrairement à l'estimation des effets CO₂, les valeurs annuelles récentes de la part de l'aviation dans l'augmentation de l'ERF anthropique présentent de fortes variations. Ces valeurs sont donc peu représentatives, ce qui explique l'absence de ce chiffre pour l'année 2018.

Comparaison des effets CO₂ et non-CO₂ [section 2.3]

Si les effets CO₂ sont les plus faciles à appréhender, ce sont néanmoins les effets non-CO₂ qui sont prépondérants avec un impact climatique deux fois plus important. En effet, entre 1750 et 2018, les effets non-CO₂ ont induit une hausse du forçage radiatif de 66 mW m⁻² contre une hausse de 34 mW m⁻² pour les effets CO₂. Les effets non-CO₂ sont dominés par les cirrus induits par les traînées de condensation, qui sont responsables de 86 % des effets non-CO₂.

Des incertitudes significatives pèsent encore sur l'estimation des effets non-CO₂. C'est particulièrement le cas des traînées de condensation dont l'impact est estimé à 57 mW m⁻², mais qui a 90 % de chance d'être dans l'intervalle qui va de 17 mW m⁻² à 98 mW m⁻². Par ailleurs, l'effet des NO_x pourrait être sous-estimé, alors que les incertitudes qui pèsent sur l'estimation de l'impact climatique des interactions aérosol-nuage sont si fortes que ces dernières sont généralement exclues de l'évaluation de l'ERF induit par l'aviation.

Enfin, les effets CO₂ et non-CO₂ sont de natures fondamentalement différentes. En effet, les effets CO₂ sont cumulatifs et de long terme, et dépendent donc de la valeur cumulée des émissions de CO₂, alors que les effets non-CO₂ sont instantanés et de court terme. Cette différence a des conséquences importantes sur leurs impacts respectifs sur le forçage radiatif.

DÉCOMPOSITION DE KAYA



Décomposition de Kaya [chapitre 3]

La décomposition de Kaya offre un cadre conceptuel utile pour identifier les différents leviers à disposition d'un secteur d'activité donné pour diminuer ses émissions de CO₂. Adaptée au secteur aérien, elle peut s'écrire :

$$\underbrace{\text{CO}_2}_{\text{Émissions de CO}_2} = \underbrace{\frac{\text{CO}_2}{E}}_{\text{Intensité carbone}} \times \underbrace{\frac{E}{\text{Trafic}}}_{\text{Intensité énergétique}} \times \underbrace{\text{Trafic}}_{\text{Trafic}}$$

Les émissions de CO₂ sont ainsi exprimées comme le produit entre :

- l'intensité carbone : la quantité de CO₂ libérée par unité d'énergie (E) utilisée ;
- l'intensité énergétique : la quantité d'énergie (E) utilisée pour qu'un passager parcoure un kilomètre ;
- le trafic : le nombre total de kilomètres effectués par l'ensemble des passagers, exprimé en passager-kilomètre, noté pass-km.

Alors que les deux premiers termes sont d'ordre technique, le dernier est d'ordre sociétal et dépendra d'évolutions politiques, économiques et culturelles.

La *figure 3* montre l'évolution de ces différents termes entre 1973 et 2018. Le carburant utilisé étant resté essentiellement le même, l'intensité carbone n'a pas évolué sur cette période. On voit par contre que l'intensité énergétique a diminué de presque 80 % en 45 ans, illustrant les progrès technologiques très importants effectués par le secteur aérien. L'efficacité énergétique, définie comme l'inverse de l'intensité énergétique, a donc été multipliée par 5. Néanmoins, cette diminution d'un facteur 5 de l'énergie consommée par passager-kilomètre a été largement compensée par la multiplication par 13 du trafic sur la même période, conduisant finalement à un quasi triplement des émissions de CO₂.

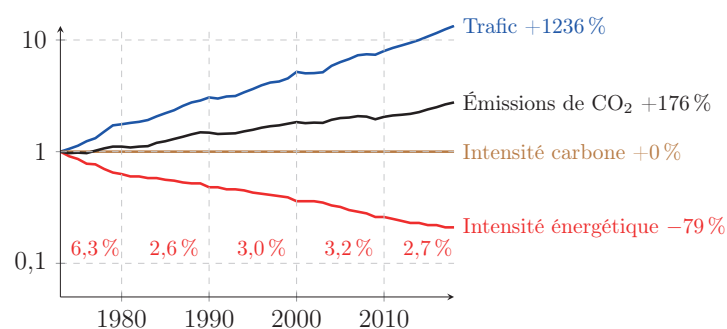


Figure 3 : Évolution des paramètres de la décomposition de Kaya entre 1973 et 2018, en partant d'une base 1 en 1973. Les chiffres en bas indiquent le taux composé des variations annuelles de l'intensité énergétique par décennie, et ceux à droite l'évolution en 2018 par rapport à 1973.

Chaque terme de la décomposition de Kaya correspond à un levier envisageable pour réduire les émissions :

- la diminution de l'intensité énergétique est un levier d'efficacité ;
- la diminution de l'intensité carbone est un levier de décarbonation du carburant ;
- la diminution du trafic est un levier de sobriété.

Les deux leviers technologiques (efficacité et décarbonation) sont détaillés dans le référentiel alors que le levier du niveau de trafic aérien est considéré comme une variable dont l'influence est analysée dans différents scénarios.



AMÉLIORER L'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE

De multiples leviers [chapitre 4]

Depuis les débuts de l'aviation commerciale, les avions ont globalement conservé une architecture standard dite *tube-and-wing*, constituée d'un fuselage, d'une aile et d'empennages. Pour la propulsion, deux types de moteurs sont principalement utilisés : la majorité des avions commerciaux sont équipés de turbofans alors que certains avions régionaux utilisent des turbopropulseurs. Ces derniers disposent d'un meilleur rendement mais sont moins puissants et limités en vitesse en comparaison des turbofans.

L'efficacité énergétique des avions peut alors être améliorée :

- soit de manière incrémentale sans modification fondamentale de l'architecture avion ou de son système propulsif ;
- soit par des innovations de rupture qui réinventent tout ou partie de l'architecture avion.

Quel que soit le type d'amélioration, le renouvellement des plus vieux avions de la flotte par ces nouveaux avions plus efficaces permet alors de diminuer l'intensité énergétique de l'aviation. Elle peut aussi être diminuée en jouant sur des leviers opérationnels comme le taux de remplissage des avions ou les opérations en vol et au sol (trajectoires, gestion du trafic aérien...). Ces leviers opérationnels ne sont pas détaillés dans le référentiel mais sont pris en compte lors de l'évaluation de scénarios.

Enfin, la vitesse d'un avion ne peut pas être directement considérée comme un levier d'amélioration de l'efficacité. En effet, pour un avion existant, diminuer sa vitesse de vol ne permet a priori pas de réduire sa consommation. En revanche, l'utilisation d'un avion équipé de turbopropulseurs à la place d'un avion équipé de turbofans (et volant donc moins vite) permettrait des gains de consommation de l'ordre de 20 %.

Améliorations incrémentales [sections 5.1 à 5.5]

Historiquement, les gains d'efficacité ont été obtenus de manière incrémentale par les différents acteurs du secteur (motoristes, avionneurs et systémiers) qui travaillent en général séparément sur quatre disciplines : la propulsion, l'aérodynamique, la structure et les systèmes avion, ces derniers assurant les fonctions non propulsives comme le conditionnement d'air ou les commandes de vol.

L'amélioration des moteurs est un levier majeur pour réduire la consommation des avions. Au-delà de l'amélioration du cycle thermodynamique de la turbine à gaz, l'augmentation du taux de dilution représente la piste la plus prometteuse sur les nouvelles architectures moteur, avec notamment l'avènement à court terme des moteurs de type *Ultra High Bypass Ratio* et *Open Rotor* (figure 4).

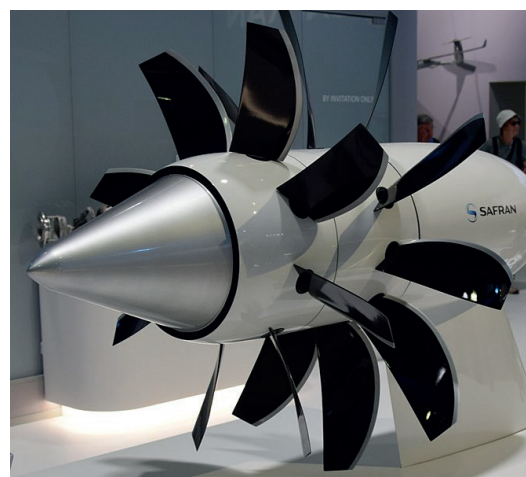


Figure 4 : Exemple de moteur type Open Rotor ([Wikimedia Commons](#)).

L'amélioration de l'aérodynamique de l'avion représente aussi un levier important visant à la réduction des trois principales sources de traînée de l'avion :

- la traînée de frottement : conception d'ailes fonctionnant en régime laminaire ;
- la traînée induite : augmentation de l'envergure des ailes et modification de la forme des bouts d'aile ;
- la traînée parasite : optimisation de l'intégration des composants avion sur l'aéronef.

Diminuer la masse d'un avion permet de réduire sa consommation. Une grande partie de l'allègement de la structure provient du remplacement des structures métalliques par des matériaux composites. Des gains de masse peuvent encore être réalisés grâce aux nouveaux procédés de fabrication additive (impression 3D).

L'amélioration des systèmes avion, qui représentent entre 5 et 10 % de la consommation de carburant, se fera principalement via leur électrification. Cette dernière, déjà présente pour certains sous-systèmes des dernières générations d'avions, permettra d'augmenter les rendements des composants en remplacement des systèmes pneumatiques et hydrauliques. En revanche, des verrous technologiques demeurent sur la gestion thermique, leur densité de puissance et leur fiabilité en particulier pour l'électronique de puissance.

Au total, le renouvellement de la flotte intégrant ces améliorations incrémentales ainsi que l'amélioration des opérations permettent d'envisager des gains d'efficacité d'au plus 2 % par an dans les années à venir.

Ruptures technologiques [section 5.6]

Ces taux envisagés pour l'amélioration de l'efficacité sont plus faibles que les taux historiques rapportés sur la [figure 3](#), ce qui préfigure que des limites technologiques sont en passe d'être atteintes. Pour envisager des gains d'efficacité plus importants, il est nécessaire de concevoir de nouvelles architectures optimisées, intégrant les quatre disciplines évoquées précédemment.

Il est possible de repenser la forme des avions à l'image de l'aile volante illustrée à la [figure 5](#). Ce type d'architecture permettrait d'améliorer l'efficacité énergétique de l'ordre de 25 %. Des transformations architecturales profondes sont également envisagées sur les systèmes propulsifs avec des architectures distribuées et/ou enterrées basées sur l'ingestion de couche limite ([figure 5](#)). Les gains d'efficacité attendus sont néanmoins plus faibles et inférieurs à 5 %. Enfin, le système propulsif de l'avion pourrait lui aussi être repensé avec par exemple l'avènement de la propulsion hybride-électrique, qui permet une meilleure utilisation de l'énergie.

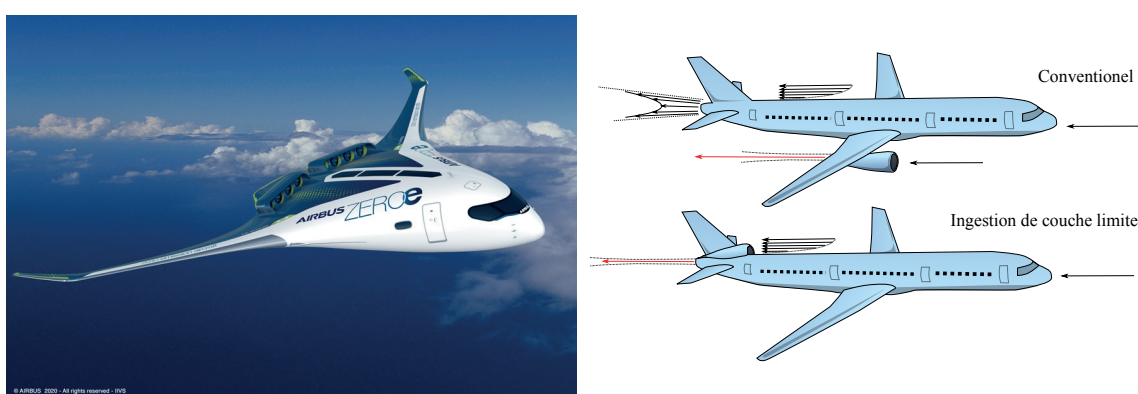


Figure 5 : Exemples d'architectures de rupture. À gauche, un concept d'aile volante (Airbus).
À droite, le principe de l'ingestion de couche limite (Binder).

En revanche, de nombreux verrous demeurent pour mettre en place ces ruptures technologiques prometteuses. Leur développement devra faire face à des difficultés techniques et de certification et elles ne seront donc pas mures avant les années 2030. Par ailleurs, ces nouvelles architectures nécessiteront des synergies renforcées entre les différents acteurs du secteur.



DÉCARBONER LE CARBURANT

Depuis ses débuts, l'aviation utilise le même vecteur énergétique, à savoir du kérosène d'origine fossile dont l'intensité carbone, incluant sa production, vaut aujourd'hui 88 gCO₂-eq/MJ. Décarboner le carburant consiste à remplacer ce vecteur énergétique par un autre vecteur énergétique potentiellement bas-carbone. Actuellement, quatre vecteurs énergétiques alternatifs sont principalement envisagés.

Électricité stockée dans des batteries [section 6.1]

L'intérêt d'un avion tout électrique réside dans la suppression de toutes les émissions directes, aussi bien de CO₂, de NO_x, de suie que de vapeur d'eau, réduisant ainsi l'impact climatique de la phase de vol à zéro. En revanche, la production de l'électricité engendre des émissions de CO₂.

À l'heure actuelle, le développement de grands avions tout électriques est limité par la densité énergétique massique des batteries électriques. Si des petits avions tout électriques (9 passagers, distance franchissable de 1000 km) sont envisageables à court terme avec les densités actuelles de 1 MJ/kg, un court-courrier tout électrique (180 passagers, distance franchissable de 1000 km) nécessiterait des densités de l'ordre de 3 MJ/kg qui ne sont pas envisagées avant plusieurs dizaines d'années.

Hydrogène [section 6.2]

Pour les applications aéronautiques, l'hydrogène sera vraisemblablement stocké sous forme liquide afin de minimiser le volume occupé, ce qui nécessite de le maintenir à -253 °C. Pour une même quantité d'énergie, l'hydrogène liquide est trois fois plus léger mais prend quatre fois plus de place que le kérosène conventionnel. Ce volume plus important nécessite de revoir l'architecture de l'avion.

L'hydrogène peut être soit utilisé dans une pile à combustible, mais les densités de puissance sont limitées, soit brûlé dans une turbine à gaz. En se focalisant sur ce second cas, la combustion de l'hydrogène n'émet pas de CO₂ mais sa production en engendre. Cette combustion émet aussi des NO_x et de la vapeur d'eau, mais pas de suie. Les effets non-CO₂ ne seraient donc pas supprimés mais ils seraient a priori réduits par rapport à un avion conventionnel.

Électrocarburants [section 6.3.3]

Les électrocarburants sont des carburants de synthèse produits à partir d'hydrogène obtenu par électrolyse de l'eau, et de CO₂ qui provient soit de l'atmosphère, soit de sources industrielles. Ainsi, seule de l'électricité est nécessaire pour les produire. Les rendements de cette voie de production varient entre 40 et 50 % suivant la concentration en CO₂ de la source utilisée. La concentration du CO₂ atmosphérique vaut 0,04 % alors qu'en sortie de processus industriels, cette concentration peut être bien plus élevée, de l'ordre de 35 % dans les fumées produites par les aciéries, et même jusqu'à 100 % pour certains procédés thermochimiques comme la production d'ammoniac.

Biocarburants [section 6.3.2]

Les biocarburants sont des carburants de synthèse produits à partir de biomasse : cultures bioénergétiques dédiées, résidus agricoles et forestiers, huiles de cuisson usagées ou encore déchets municipaux. Différentes voies de production peuvent exploiter ces matières premières pour les convertir en carburant de synthèse.

À ce jour, la seule voie de production développée à l'échelle industrielle est la voie HEFA à partir de matières premières lipidiques (huiles végétales). C'est par cette voie que la totalité des biocarburants du secteur aérien ont été produits en 2018, soit 15 millions de litres de biocarburants qui ont représenté 0,004 % de la consommation énergétique du secteur aérien. D'autres voies de production, notamment la voie Fischer-Tropsch qui permet d'exploiter les ressources lignocellulosiques, sont envisagées pour l'avenir mais sont à différents stades de développement.

Développer des filières de production bas-carbone [sections 6.1, 6.3.2, 6.4]

L'électricité, l'hydrogène et les électrocarburants sont les carburants alternatifs les moins matures. Leur production engendre des émissions de CO₂ potentiellement importantes. Ainsi, l'intensité carbone des méthodes actuelles de production d'hydrogène liquide vaut 153 gCO₂-eq/MJ, et celle du mix électrique mondial vaut 132 gCO₂-eq/MJ. Puisque ces valeurs sont supérieures aux 88 gCO₂-eq/MJ du kérosène, utiliser ces vecteurs énergétiques dans leur condition actuelle de production augmenterait les émissions de CO₂. Avant que ces vecteurs ne deviennent bénéfiques d'un point de vue climatique, il est donc indispensable de développer des filières bas-carbone de production d'électricité à partir d'énergies renouvelables ou d'énergie nucléaire.

Les biocarburants sont aujourd'hui la solution de décarbonation la plus mature du point de vue technologique. Leur combustion émet approximativement autant de CO₂ que celle du kérosène d'origine fossile, mais comme ce CO₂ ne provient pas des réserves fossiles mais de l'atmosphère où il a été capté pendant la croissance de la biomasse, cela permet d'espérer une réduction des émissions sur l'ensemble du cycle de vie. Par ailleurs, la culture de la biomasse engendre aussi des émissions liées à l'usage des sols, qui dépendent de nombreux facteurs physiques mais aussi socio-économiques, et qui font que les émissions liées aux biocarburants sont difficiles à évaluer. La [figure 6](#) fournit des estimations de facteurs d'émission sur l'ensemble du cycle de vie de différents biocarburants. Les biocarburants produits à partir de matière cellulosique présentent le plus d'intérêt climatique et ils permettent d'envisager des biocarburants qui, sur l'ensemble du cycle de vie, diminuent les émissions de l'ordre de 75 % par rapport au kérosène d'origine fossile.

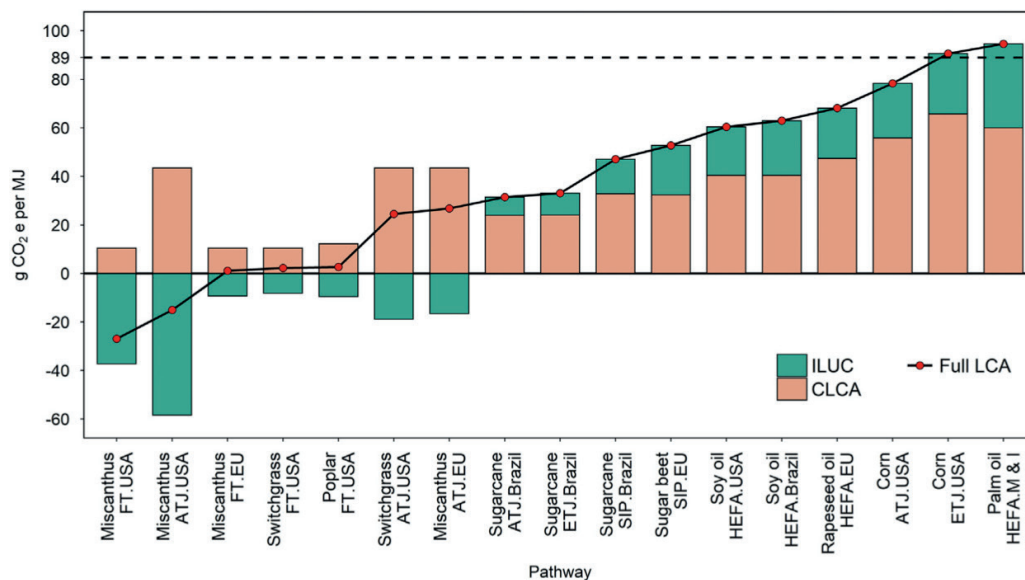


Figure 6: Émissions de différents biocarburants sur l'ensemble du cycle de vie (Zhao et al.). La partie verte correspond aux émissions liées au changement d'usage des sols et la partie orange aux autres émissions sur le reste du cycle de vie (culture de la biomasse, production du carburant synthétique...).

Dans tous les cas, la comparaison entre la situation actuelle et l'utilisation de nouveaux vecteurs énergétiques nécessite de considérer l'ensemble du cycle de vie, et donc de prendre en compte les émissions de CO₂ dues à la production du carburant dans l'estimation de l'impact climatique de l'aviation.



SCÉNARIOS DURABLES : ARBITRAGE ENTRE TRAFIC ET BUDGET CARBONE

Plusieurs travaux scientifiques récents ont proposé des méthodologies pour évaluer la durabilité de scénarios pour l'aviation commerciale. L'objectif de cette partie est de présenter une méthodologie spécifique développée à l'ISAE-SUPAERO et de l'appliquer sur quelques scénarios illustratifs.

Méthodologie et budgets carbone pour l'aviation [sections 1.3.3, 8.1, 8.3]

L'analyse des scénarios est basée sur la notion de budget carbone. Sa définition dépend de la notion de neutralité carbone, qui désigne un état où la quantité de CO₂ émise par les activités humaines est égale à la quantité de CO₂ captée par les puits de carbone anthropiques. Le budget carbone représente alors la quantité cumulée maximale de CO₂ que l'Humanité peut émettre dans l'atmosphère avant d'atteindre la neutralité carbone tout en limitant le réchauffement climatique sous une température donnée.

Nous considérons principalement les budgets carbone mondiaux médians pour +1,5 °C et +2 °C, en tant que valeurs extrêmes de l'accord de Paris, et nous considérons des scénarios à horizon 2050. Ces budgets carbone peuvent être corrigés en intégrant les éventuels puits de carbone anthropiques, ils sont alors qualifiés de brut. Le choix de la part du budget carbone mondial allouée au secteur aérien est d'ordre politique (économique, sociétal...) et des plages de valeurs envisageables sont donc considérées. Pour évaluer la durabilité d'un scénario, il suffit alors de comparer les émissions cumulées de l'aviation avec le budget carbone qui lui est alloué. Si les émissions cumulées sont supérieures, on peut considérer que l'aviation n'est pas alignée avec les engagements climatiques, et inversement.

Concernant la part du budget carbone mondial allouée à l'aviation, une valeur de référence correspond à la part récente de l'aviation commerciale dans les émissions mondiales de CO₂, à savoir 2,6 % en 2018 (cf. [tableau 1](#)). Cette valeur correspond à la part qui serait allouée au secteur aérien dans le cadre d'une approche non différenciée où tous les secteurs d'activité réduiraient leurs émissions au même taux annuel à partir de 2018. Des allocations inférieures ou supérieures à cette valeur peuvent aussi être considérées, l'attribution d'une part plus grande (respectivement plus petite) à l'aviation nécessitant mécaniquement que d'autres secteurs d'activité réduisent leurs émissions plus vite (respectivement plus lentement) que la moyenne.

Analyse de scénarios durables pour l'aviation [section 9.2]

Pour analyser des scénarios durables pour l'aviation, l'outil [CAST](#), développé à l'ISAE-SUPAERO, est utilisé. Il permet de simuler des scénarios de transition pour l'aviation et d'évaluer leur impact climatique.

Trois scénarios technologiques illustratifs sont considérés : un scénario tendanciel sans décarbonation du carburant (T), un scénario tendanciel avec décarbonation partielle (TD) et un scénario avec rupture technologique et décarbonation totale (RT). Les caractéristiques principales de ces scénarios sont fournies dans le [tableau 2](#). On considère que les carburants bas-carbone permettront de réduire, sur l'ensemble du cycle de vie, les émissions de CO₂ de 75 % en moyenne par rapport au kérosène. Ces différentes hypothèses permettent d'aboutir à des facteurs d'émission par passager-kilomètre en 2050 situés entre 17 gCO₂-eq/pass·km et 89 gCO₂-eq/pass·km. Ces valeurs peuvent être comparées à l'intensité carbone de la flotte mondiale en 2019, qui vaut 131 gCO₂-eq/pass·km, ou à celle des avions de dernière génération, qui vaut moins de 100 gCO₂-eq/pass·km.

Scénario	T	TD	RT
Amélioration annuelle de l'efficacité énergétique entre 2020 et 2050	1 %	1 %	1,5 %
Taux de remplissage moyen en 2050	89 %	89 %	92 %
Réduction de consommation via les opérations en 2050 par rapport à 2020	0 %	8 %	12 %
Part de la flotte qui utilisera en 2050 des carburants bas-carbone	0 %	50 %	100 %
Facteur d'émission en 2050 (gCO ₂ -eq/pass·km)	89	52	17

Tableau 2 : Principales hypothèses technologiques pour les trois scénarios illustratifs étudiés.

Une fois ces scénarios technologiques définis, une analyse paramétrique peut être réalisée en considérant différents budgets carbone mondiaux ainsi que différentes parts allouées à l'aviation commerciale. Le taux de croissance du trafic est alors ajusté afin que les émissions cumulées du scénario soient égales au budget carbone alloué à l'aviation. En ce sens, le taux de croissance résultant est donc un taux de croissance durable maximal.

La *figure 7* représente le taux de croissance durable du trafic aérien pour différentes allocations et pour les trois scénarios illustratifs, en considérant les budgets carbone médians pour +1,5 °C et +2 °C. Pour +1,5 °C, une allocation de 2,6 % du budget carbone mondial au secteur aérien (ligne verticale) implique une forte décroissance du trafic quel que soit le scénario. Pour atteindre le taux de croissance tendanciel du trafic aérien de 3 % (ligne horizontale), il faudrait allouer au secteur aérien 6 % du budget carbone mondial dans le cas du scénario le plus ambitieux RT. Pour limiter le réchauffement à +2 °C, les résultats sont plus nuancés : le scénario le plus pessimiste T nécessiterait une baisse annuelle du trafic aérien de 1,8 % quand le scénario le plus optimiste RT permettrait une croissance annuelle de 2,9 % dans le cas d'une allocation de 2,6 %.

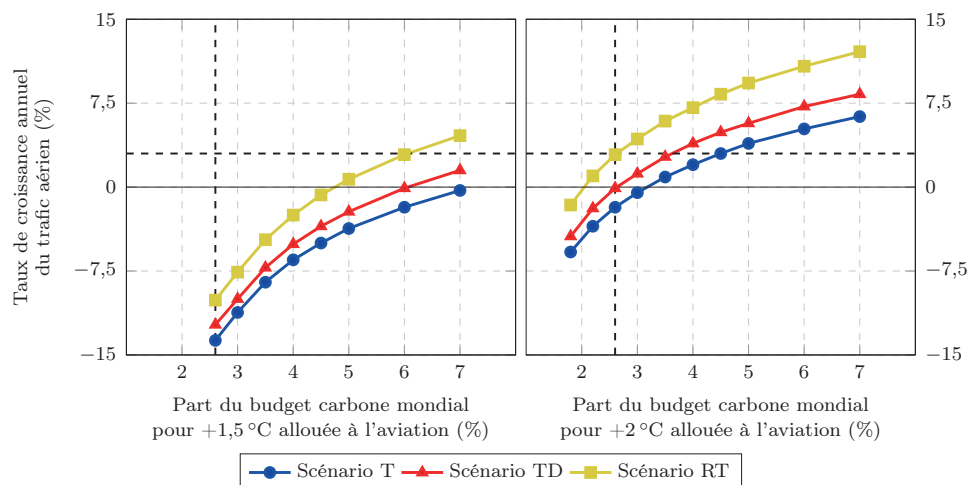
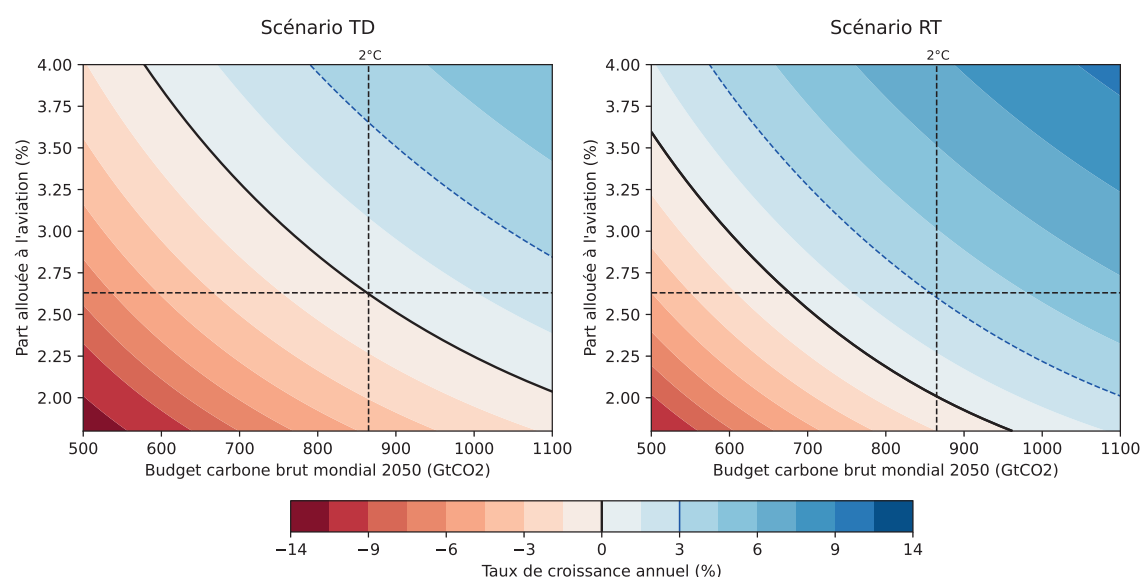


Figure 7 : Taux de croissance du trafic aérien en fonction de la part du budget carbone mondial allouée à l'aviation commerciale pour les scénarios T, TD et RT. Lecture (figure de gauche) : si l'on alloue 3 % du budget carbone pour +1,5 °C au secteur aérien, alors le taux maximal de croissance du trafic dans le cadre du scénario RT vaut -7,5 %.

Cette étude peut être étendue à d'autres budgets carbone. La [figure 8](#) montre ainsi les résultats d'une analyse paramétrique pour différents budgets carbone mondiaux dans le cadre des scénarios TD et RT. La ligne verticale représente le budget carbone médian pour +2 °C pour référence. Cette figure permet une analyse plus exhaustive et aussi d'éclairer les arbitrages à faire entre taux de croissance du trafic aérien et part du budget carbone mondial allouée au secteur aérien pour un objectif climatique donné.



Limites de déploiement et de ressources [sections 6.4, 9.4.1, 9.4.3]

L'analyse des différents scénarios fait ressortir deux limites qui impactent significativement la capacité du secteur aérien à diminuer rapidement et fortement ses émissions de CO₂.

Tout d'abord, des limites existent sur la vitesse de déploiement des solutions technologiques. En effet, puisque ce sont les émissions cumulées de CO₂ qui comptent, la réduction des émissions doit être précoce pour être efficace. Pourtant, les améliorations incrémentales et opérationnelles de l'efficacité énergétique, avec des gains d'au plus 2 % par an, ne permettront pas une réduction suffisamment rapide des émissions et les innovations de rupture (par exemple aile volante ou avion à hydrogène) ne sont pas attendues avant les années 2030. Par ailleurs, les solutions reposant sur de l'électricité ne deviendront intéressantes qu'à partir du moment où le mix électrique mondial sera devenu bas-carbone, ce qui peut prendre plusieurs décennies.

Le second frein concerne les limites en ressources énergétiques, qui s'appliquent à l'ensemble des carburants alternatifs envisagés. Les études scientifiques disponibles à ce jour montrent qu'en cas de forte croissance du trafic, il est peu probable que les biocarburants représentent plus de 20 % de la consommation énergétique mondiale de l'aviation en 2050. La demande en électricité bas-carbone pourrait elle aussi se heurter à des limites de disponibilité, certains scénarios pour l'aviation en 2050 prévoyant ainsi que le secteur aérien aurait besoin de plus de 30 % de la totalité de l'électricité produite au niveau mondial.



Des effets à court terme [section 2.3]

Les effets non-CO₂ ayant une courte durée de vie, leur atténuation à court terme est possible. Cette caractéristique est visible sur la [figure 9](#) : il existe une forte corrélation entre variation de trafic et variation de l'impact climatique de l'aviation, alors que la variation de l'impact climatique dû aux effets CO₂ est très stable. Cela illustre à la fois la part prépondérante des effets non-CO₂, ainsi que les aspects cumulatif et de court-terme des effets CO₂ et non-CO₂, respectivement. Ainsi, lorsque le trafic aérien baisse, comme en 2009, l'impact climatique de l'aviation diminue aussi alors que l'impact dû aux effets CO₂ ne baisse pas mais augmente moins rapidement.

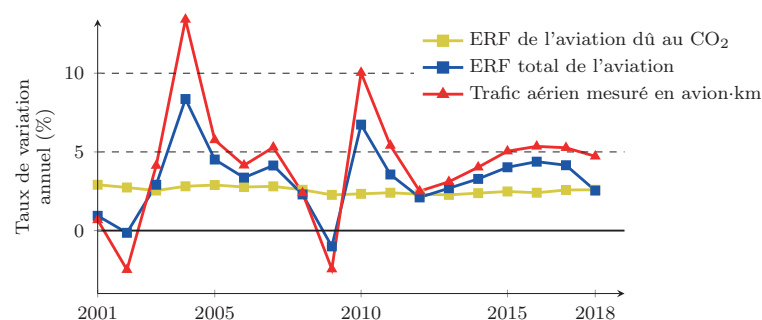


Figure 9 : Taux de variation annuel de l'ERF dû à l'aviation et du trafic aérien. Lecture : en 2010, l'ERF total de l'aviation a augmenté de 6,7 %, l'ERF de l'aviation dû aux seuls effets CO₂ de 2,3 % et le trafic aérien (mesuré en avion-kilomètre) de 10 %.

Leviers contre les effets non-CO₂ [chapitre 7]

Plusieurs études récentes suggèrent qu'il est possible de diminuer de manière significative l'impact climatique des effets non-CO₂, notamment des traînées de condensation.

D'une part, les émissions non-CO₂ des carburants alternatifs sont différentes de celles du kérosène d'origine fossile. Ainsi, ces carburants alternatifs pourraient avoir un rôle bénéfique d'atténuation des effets non-CO₂. Par exemple, l'utilisation de biocarburants à un taux d'incorporation de 50 % pourrait diminuer de 10 à 25 % l'impact climatique du secteur aérien. Cette évaluation nécessite d'être affinée et consolidée, notamment en ce qui concerne les traînées de condensation.

D'autre part, une des pistes les plus prometteuses pour diminuer les effets non-CO₂ concerne les stratégies opérationnelles qui reposent sur la modification de la trajectoire de certains avions. En effet, seule une petite fraction des vols est responsable de la majorité de la formation des traînées. Ainsi, une étude récente dans l'espace aérien du Japon conclut que 2 % des vols sont responsables de 80 % des traînées de condensation. Cela ouvre la perspective à des stratégies d'atténuation efficaces basées sur la modification des trajectoires d'un nombre restreint de vols au prix d'une très faible surconsommation de carburant, inférieure à 1 %.

Des stratégies prometteuses [section 9.4.2]

À l'heure actuelle, ces stratégies semblent prometteuses pour diminuer significativement et rapidement les effets non-CO₂. Leur généralisation entraînerait rapidement une limitation voire une réduction (par rapport à 2018) du réchauffement climatique causé par l'aviation. Elles représentent donc un levier majeur pour atteindre les objectifs de l'accord de Paris en terme de température. Des travaux sont encore nécessaires pour confirmer ces résultats scientifiques récents, ainsi que pour élaborer des scénarios de déploiement. Néanmoins, ces solutions ne peuvent pas se substituer aux mesures de réduction des émissions de CO₂, qui sont prépondérantes à long terme sur l'évolution de la température.

Adresse postale

ISAE-SUPAERO

10, avenue E. Belin - BP 54032

31055 Toulouse CEDEX 4 - France

Téléphone

33 (0)5 61 33 80 80

Site internet

www.isae-supaero.fr

